

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



533 680

(43) Date de la publication internationale
27 mai 2004 (27.05.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/044790 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G06F 17/50

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2003/003323

(22) Date de dépôt international :
6 novembre 2003 (06.11.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
02/14108 12 novembre 2002 (12.11.2002) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE -CNRS- [FR/FR]; 3, rue Michel Ange,
F-75794 Paris Cedex 16 (FR). ECOLE NORMALE
SUPERIEURE DE CACHAN [FR/FR]; 61, avenue du
Président Wilson, F-94235 Cachan (FR). UNIVERSITE
PARIS SUD (PARIS 11) [FR/FR]; 15, rue Georges
Clémenceau, F-91405 Orsay (FR). UNIVERSITY OF
ARIZONA [US/US]; BABCOCK BLDG RM 3205, 1717
E. Speedway Blvd, Tucson, AZ 85721 (US).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : PLACKO,
Dominique [FR/FR]; 21, allée de la Toison d'Or, F-94000
Créteil (FR). LIEBEAUX, Nicolas [FR/FR]; 10, rue
Guichard, F-94230 Cachan (FR). KUNDU, Tribikram
[US/US]; 1201 East Chula Vista RD., Tucson, 85718 (US).

(74) Mandataires : LOISEL, Bertrand etc.; Cabinet Plasser-
aud, 65/67, rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex 09
(FR).

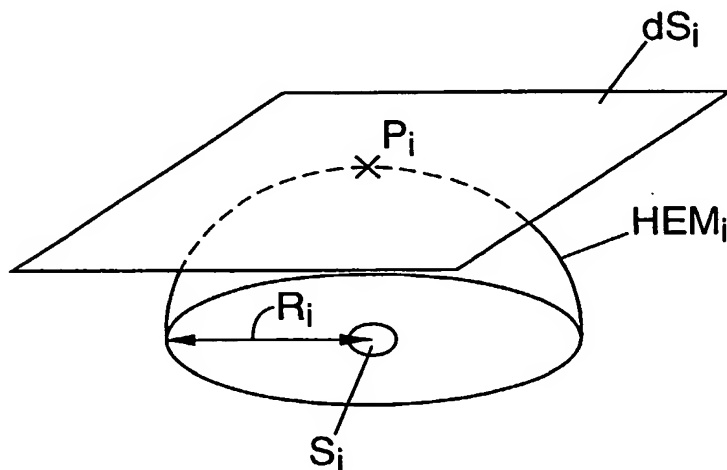
(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE,
GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR,
KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK,
MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT,
RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (BW, GH, GM,
KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet
eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet
européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR EVALUATING A PHYSICAL QUANTITY REPRESENTING AN INTERACTION BETWEEN A
WAVE AND AN OBSTACLE

(54) Titre : PROCEDE POUR EVALUER UNE GRANDEUR PHYSIQUE REPRESENTATIVE D'UNE INTERACTION ENTRE
UNE ONDE ET UN OBSTACLE



(57) Abstract: The invention concerns the modelling of interactions between an incident wave and an obstacle, in particular in the field of non-destructive control. The invention is characterized in that it consists in: meshing the obstacle surface and assigning at least one source (S_i) to each surface element (dS_i); then calculating conditions at the boundaries in each mesh of the obstacle and deducing therefrom source values; based on an interaction matrix and said source values, estimating a physical quantity representing the interaction between the wave and the obstacle, in any point of space.

(57) Abrégé : L'invention concerne la modélisation des interactions entre une onde incidente et un obstacle, notamment dans le domaine du contrôle non destructif. Selon l'invention, on maille la surface de l'obstacle et l'on attribue

au moins une source (S_i) à chaque élément de surface (dS_i). On calcule ensuite des conditions aux limites en chaque maille de l'obstacle et l'on en déduit des valeurs de source. A partir d'une matrice d'interaction et de ces valeurs de sources, on estime une grandeur physique représentative de l'interaction entre l'onde et l'obstacle, en tout point de l'espace.

WO 2004/044790 A1



TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

- *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)) pour US seulement*

Publiée :

- *avec rapport de recherche internationale*

- *avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues*

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

Procédé pour évaluer une grandeur physique représentative
d'une interaction entre une onde et un obstacle

L'invention concerne la modélisation des interactions
5 entre une onde incidente et un obstacle de cette onde,
notamment dans le domaine du contrôle non destructif.

La modélisation des interactions entre une onde et un
obstacle recevant cette onde, tel qu'une cible placée dans
10 la zone sensible d'un capteur, trouve une application
avantageuse en contrôle non destructif.

On connaît un procédé de modélisation dit "par éléments
finis" consistant à appliquer un pavage de l'espace
15 tridimensionnel entourant l'obstacle et à évaluer les
interactions précitées pour tous les pavés de l'espace.

Les procédés de calcul par "éléments finis" apportent une
résolution à un problème posé sous forme d'équations
20 différentielles partielles. Ils se fondent sur une
représentation de l'espace d'étude par un assemblage
d'éléments finis, à l'intérieur desquels des fonctions
d'approximations sont déterminées en termes de valeurs
nodales de la grandeur physique recherchée. Le problème
25 physique continu devient donc un problème discret aux
éléments finis où les grandeurs nodales sont les nouvelles
inconnues. De tels procédés cherchent donc à approcher la
solution globale, plutôt que les équations aux dérivées
spatiales partielles de départ.

La discrétisation de l'espace pris en compte assure que ce dernier soit entièrement recouvert par des éléments finis (lignes, surfaces ou volumes), cette opération porte le nom de "maillage" dans l'espace bidimensionnel (2D) ou de "pavage" dans l'espace tridimensionnel (3D). Les éléments mis en jeu sont soit rectangulaires ou triangulaires en 2D, soit parallélépipédiques ou tétraédriques en 3D. Ils peuvent être de tailles différentes, répartis uniformément sur la surface ou non.

En général, la grandeur physique recherchée, telle qu'un potentiel électrostatique ou une valeur de pression, est connue sur la frontière du domaine. Cette frontière peut être fictive. On y impose des conditions aux limites. Le potentiel est donc inconnu à l'intérieur du même domaine. On définit alors un nœud comme étant un sommet d'un élément. Les inconnues du problème sont donc les valeurs du potentiel en chaque nœud de l'ensemble du domaine.

A titre d'illustration, la figure 6 de l'art antérieur représente un exemple de surface, constituée par deux matériaux M1 et M2, de propriétés électromagnétiques différentes, et maillée par des éléments triangulaires comportant chacun trois nœuds A_i , B_i et C_i . L'ensemble du domaine est délimité par une frontière F.

Une fois le maillage défini, plusieurs approches existent pour transformer la formulation physique du problème en une modélisation discrète aux éléments finis. Si le problème est formulé par des équations différentielles et consiste à minimiser une fonctionnelle, on applique

généralement une méthode variationnelle. Cette transformation aboutit à une formulation matricielle dont la résolution donne les solutions nodales, les solutions aux points non nodaux étant obtenues par interpolation
5 linéaire.

Néanmoins, de tels calculs, en trois dimensions, requièrent des ressources informatiques importantes et génèrent des temps de calcul très longs, en dépit de
10 l'accroissement des performances de logiciels permettant d'implémenter ces calculs.

Certes, les problèmes 2D, souvent simplifiés par des conditions de symétrie avantageuses pour ne modéliser
15 qu'une partie de la géométrie, se résolvent rapidement. Mais il n'en est rien pour les problèmes 3D, qui sont les plus fréquents. La figure 6 montre combien la finesse du maillage, c'est à dire le rapport entre la taille d'un élément et celle du plus petit détail du domaine, fait
20 croître le nombre de nœuds.

En conséquence, la quantité d'équations et d'inconnues augmente proportionnellement, et, de là, le temps de calcul nécessaire à la résolution du problème. Il est
25 important de préciser que la génération du maillage, à savoir la discrétisation de l'espace de travail, et la génération de la liste des nœuds consomme un temps de calcul supérieur à celui nécessaire à la résolution du problème.

30

La présente invention vient améliorer la situation.

Elle propose à cet effet un procédé pour évaluer une grandeur physique associée à une interaction entre une onde et un obstacle, dans une région de l'espace tridimensionnel, dans lequel :

5 a) on détermine, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface dont une partie au moins représente la surface d'un obstacle recevant une onde principale et émettant, en réponse, une onde secondaire, et l'on attribue à chaque échantillon de surface au moins 10 une source émettant une onde élémentaire représentant une contribution à ladite onde secondaire,

b) on forme un système matriciel comportant :

15 - une matrice d'interaction, inversible, appliquée à une région donnée de l'espace et comportant un nombre de colonnes correspondant à un nombre total de sources,

20 - une première matrice colonne dont chaque coefficient est associé à une source et caractérise l'onde élémentaire qu'elle émet,

25 - et une seconde matrice colonne, obtenue par une multiplication de la première matrice colonne par la matrice d'interaction et dont les coefficients sont des valeurs d'une grandeur physique représentative de l'onde émise par l'ensemble des sources en ladite région donnée,

30 c) pour estimer les coefficients de la première matrice colonne, on affecte des valeurs de grandeur physique choisies à des points prédéterminés, associés chacun à un échantillon de surface, lesdites valeurs choisies étant rangées dans la seconde matrice colonne, et l'on multiplie

cette seconde matrice colonne par l'inverse de la matrice d'interaction appliquée auxdits points prédéterminés,
d) pour évaluer ladite grandeur physique représentant l'onde émise par l'ensemble des sources dans une région donnée de l'espace tridimensionnel, on applique la matrice d'interaction à ladite région donnée et on multiplie cette matrice d'interaction par la première matrice colonne comportant les coefficients estimés à l'étape c).

10 Ainsi, selon l'un des avantages que procure la présente invention, l'étape de maillage a) ne concerne qu'une ou plusieurs surfaces, tandis que le procédé de modélisation de type "par éléments finis" nécessite un pavage de tout l'espace avoisinant l'obstacle, ce qui permet de réduire,
15 dans la mise en œuvre du procédé selon l'invention, les ressources mémoires et les temps de calcul nécessaires.

Le procédé selon l'invention s'applique aussi bien à une onde principale émise par une source lointaine qu'à une
20 onde principale émise en champ proche.

Avantageusement, pour évaluer une grandeur physique représentative d'une interaction entre un élément rayonnant une onde principale en champ proche et un
25 obstacle recevant cette onde principale,
- à l'étape a), on détermine en outre, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface représentant ensemble une surface active de l'élément rayonnant l'onde principale, et l'on attribue à chaque échantillon de la
30 surface active au moins une source émettant une onde

élémentaire représentant une contribution à ladite onde principale,

- on applique les étapes b), c) et d) aux échantillons de la surface active, et

- 5 - on évalue ladite grandeur physique représentant l'interaction entre l'élément rayonnant et l'obstacle dans une région donnée de l'espace tridimensionnel, en prenant en compte la contribution, en ladite région donnée, de l'onde principale émise par l'ensemble des sources de la surface active et la contribution de l'onde secondaire
10 émise par l'ensemble des sources de la surface de l'obstacle.

On entend par les termes "élément rayonnant" aussi bien un
15 émetteur de l'onde principale, tel qu'un générateur d'ondes, qu'un récepteur de l'onde principale, tel qu'un capteur de cette onde.

Dans un premier mode de réalisation, la grandeur physique
20 à évaluer est une grandeur scalaire et, à l'étape a), on attribue une source unique à chaque échantillon de surface.

Dans un second mode de réalisation, la grandeur physique à
25 évaluer est une grandeur vectorielle exprimée par ses trois coordonnées dans l'espace tridimensionnel, et on attribue, à l'étape a), trois sources à chaque échantillon de surface.

30 Dans une réalisation avantageuse, pour estimer, à l'étape d), la contribution de l'onde secondaire dans la région

donnée de l'espace, les valeurs de grandeur physique choisies à l'étape c) sont fonction d'un coefficient prédéterminé de réflexion et/ou de transmission de l'onde principale par chaque échantillon de surface de l'obstacle.

Ainsi, on comprendra que l'onde secondaire peut aussi bien correspondre à une réflexion de l'onde principale, qu'à une transmission de l'onde principale, ou encore à une diffraction de l'onde principale. Dans cette réalisation avantageuse, l'étape c) correspond finalement à une détermination des conditions aux limites à la surface de l'obstacle, en tant qu'interface entre deux milieux distincts notamment dans une hétérostructure.

Par ailleurs, pour un contrôle non destructif d'une cible formant un obstacle d'une onde principale, on attribue un coefficient de réflexion ou de transmission choisi à tous les points prédéterminés de la surface de la cible, et on compare une simulation obtenue par la mise en œuvre du procédé au sens de l'invention avec une mesure expérimentale. Ainsi, les points de la surface de la cible qui, dans la mesure expérimentale, ne vérifient pas la simulation correspondent à des inhomogénéités ou à des impuretés sur la surface de la cible.

Dans une autre approche, on connaît les propriétés globales de l'obstacle, notamment en transmission et/ou en réflexion. Par la mise en œuvre du procédé de l'invention, on optimise alors la position dans l'espace d'un capteur ou même la forme de ce capteur, pour une application à un

contrôle non destructif, ce capteur étant destiné à analyser une cible formant un obstacle de l'onde principale.

5 A cet effet, dans une réalisation avantageuse, on compare une pluralité de valeurs de la grandeur physique estimée à l'étape d) du procédé au sens de l'invention, obtenues pour une pluralité de régions de l'espace, pour sélectionner une région candidate pour la disposition d'un
10 élément rayonnant destiné à interagir avec l'obstacle.

Comme indiqué ci-avant, on entend par les termes "élément rayonnant" aussi bien un capteur qu'un générateur de l'onde. On comprendra ainsi que l'optimisation de la
15 position de l'élément rayonnant peut s'appliquer aussi à l'optimisation de la disposition ou de la forme d'un générateur d'ondes. Par exemple, la présente invention trouve encore une application avantageuse à la disposition de haut-parleurs dans un volume fermé, délimité par des
20 obstacles, comme par exemple l'habitacle d'un véhicule automobile.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée ci-après, et des dessins annexés sur lesquels :

- 25 - la figure 1A représente schématiquement les surfaces respectives d'un élément rayonnant ER émettant une onde et d'un obstacle OBS recevant cette onde, maillées en vue d'évaluer une grandeur scalaire représentative de
30 l'onde en un point M de l'espace tridimensionnel ;

- la figure 1B représente en détail un échantillon de surface dS_1 correspondant à une maille de la figure 1A, ainsi qu'une source S_1 associée à l'échantillon de surface dS_1 ;
- 5 - la figure 2A représente schématiquement les surfaces respectives d'un élément rayonnant ER émettant une onde et d'un obstacle OBS recevant cette onde, maillées en vue d'évaluer une grandeur vectorielle représentative de l'onde en un point M de l'espace tridimensionnel ;
- 10 - la figure 2B représente en détail un échantillon de surface dS_1 correspondant à une maille de la figure 2A, ainsi que trois sources associées SA_1 , SB_1 et SC_1 ;
- la figure 2C représente, en vue de face, une surface maillée dont chaque échantillon de surface comporte
15 trois sources SA_1 , SB_1 et SC_1 , pour l'estimation d'une grandeur vectorielle ;
- la figure 3A représente, à titre illustratif, les armatures d'un condensateur, de potentiels électriques respectifs V_1 et V_2 , pour l'estimation d'un potentiel
20 électrique au point M de l'espace tridimensionnel, à chaque échantillon de surface dS_1 de la figure 3A étant associée une unique source S_1 ;
- la figure 3B représente, à titre illustratif, les armatures d'un condensateur, de potentiels électriques respectifs V_1 et V_2 , pour l'estimation d'un champ
25 électrique $\vec{E}(M)$, au point M de l'espace tridimensionnel, à chaque échantillon de surface dS_1 de la figure 3B étant associée trois sources SA_1 , SB_1 et SC_1 ;

- 5 - la figure 4A représente, comme les figures 1A et 2A, une interaction entre un élément rayonnant ER et un obstacle OBS, pour évaluer une grandeur physique (scalaire ou vectorielle) en un point M dans une portion de l'espace délimitée par la surface de l'élément rayonnant et la surface de l'obstacle, ce point de l'espace M recevant à la fois l'onde émise par l'élément rayonnant et l'onde réfléchie par l'obstacle ;
- 10 - la figure 4B, complémentaire de la figure 4A, représente une transmission par l'obstacle OBS de l'onde émise par l'élément rayonnant ER, en un point M d'un demi-espace délimité par le plan que forme la surface de l'obstacle OBS ;
- 15 - la figure 5A représente schématiquement un obstacle OBS, de dimensions finies, avec des sources associées aux échantillons de surface agencées pour estimer une grandeur représentative d'une réflexion de l'onde sur l'obstacle ;
- 20 - la figure 5B, en complément de la figure 5A, représente schématiquement un obstacle OBS, de dimensions finies, avec les sources associées aux échantillons de surface disposées pour estimer une grandeur représentative de la transmission de l'onde par l'obstacle ;
- 25 - la figure 5C représente une simulation d'une onde ultrasonore émise par un élément rayonnant ER et se propageant vers un obstacle OBS ;
- 30 - la figure 6 représente un maillage de milieux tridimensionnels, pour l'application d'un procédé de calcul par "éléments finis", au sens de l'état de la technique ;

- la figure 7A représente en détail un élément de surface et un point d'observation M dont les positions relatives sont repérées par un angle θ ; et
- la figure 7B représente schématiquement une surface à
5 mailler de forme complexe, en particulier avec un point d'observation M se situant dans une zone d'ombre par rapport à certaines sources de la surface.

On se réfère tout d'abord à la figure 1A, sur laquelle la
10 surface d'un obstacle OBS, recevant une onde, est maillée selon une pluralité d'échantillons de surface dS_1 à dS_4 , conformément à l'étape a) précitée.

En se référant à la figure 1B, à chaque échantillon de
15 surface dS_1 est associé un hémisphère HEM_1 , tangent à l'échantillon de surface dS_1 en un point de contact P_1 . Préférentiellement, ce point de contact P_1 correspond au sommet de l'hémisphère HEM_1 . Pour l'estimation d'une grandeur physique scalaire au point M (tels qu'un
20 potentiel électrostatique, une pression acoustique ou autre), une source unique S_1 est associée à l'échantillon de surface dS_1 . Comme on le verra plus loin, dans le cas de l'estimation d'une grandeur vectorielle dans un point de l'espace M, on affectera plutôt trois sources à chaque
25 échantillon de surface dS_1 .

Préférentiellement, l'hémisphère HEM_1 est construit comme décrit ci-après. Pendant l'étape de maillage a) précitée, on évalue, d'une part, la surface de l'obstacle OBS et,
30 d'autre part, on choisit un nombre d'échantillons de surface dS_1 selon la précision souhaitée de l'estimation

de la grandeur physique au point M. Ainsi, la surface d'un échantillon dS_i est donnée par S_o/N , où S_o correspond à la surface totale de l'obstacle et N correspond au nombre choisi d'échantillons de surface dS_i .

5

L'hémisphère HEM_i est de même surface que l'échantillon dS_i . Ainsi, le rayon R_i de l'hémisphère se déduit de l'expression :

$$2\pi R_i^2 = \frac{S_o}{N}$$

10

Chaque maille que représente un échantillon de surface dS_i présente, dans l'exemple décrit, une forme de parallélogramme, de centre P_i correspondant au point d'intersection des diagonales de ce parallélogramme.

15

L'hémisphère HEM_i est tangent à l'échantillon de surface dS_i en ce point P_i . Bien entendu, les mailles peuvent être de forme différente, triangulaire ou autre. On indique de façon générale que le point P_i correspond au barycentre de la maille.

20

On définit ainsi la position de la source S_i (située au centre de l'hémisphère HEM_i). La distance séparant la source S_i du point de contact P_i correspond au rayon R_i de l'hémisphère HEM_i et la droite qui passe par les points P_i et S_i est orthogonale à la maille dS_i .

25

Dans l'exemple représenté sur la figure 1A, on maille en outre la surface d'un élément rayonnant ER, correspondant par exemple à un générateur d'ondes. A chaque maille de la

surface de l'élément rayonnant est associé un échantillon de surface dS'_i , comme on le verra plus loin.

Le système matriciel que l'on met en forme à l'étape b) 5 précitée correspond à :

$$\begin{pmatrix} V(M_1) \\ V(M_2) \\ \vdots \\ V(M_N) \end{pmatrix} = F \times \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} \quad [1]$$

où :

- 10 - les coefficients v_j (avec $j=1,2,\dots,N$) de la première matrice colonne correspondent à des valeurs associées chacune à une source, telle qu'une charge électrique (dans le cas de l'estimation d'un potentiel électrique), ou encore à un flux magnétique (dans le cas de l'estimation d'un potentiel magnétique), ou encore à une vitesse sonore (dans le cas de l'estimation d'une pression acoustique liée à la propagation d'une onde sonore) ;
- 15 - les coefficients $V(M_i)$ (avec $i=1,2,\dots,N$) de la seconde matrice colonne correspondent chacun à une valeur de la grandeur physique (un potentiel électrique ou magnétique ou une pression) à estimer en un point M_i de l'espace ;
- 20 - la matrice d'interaction F comporte des coefficients $C_{i,j}$ dont l'expression générale est donnée par :

25

$$C_{i,j} = f(M_i S_j) \quad [2]$$

On comprendra ainsi que les coefficients de la matrice F sont des coefficients d'interaction qui dépendent de la distance séparant chaque point de l'espace M_i d'une source S_j associée à une maille dS_j .

5

Dans le cas de la propagation d'une onde électrique, les coefficients $c_{i,j}$, v_j et $V(M_i)$, respectivement de la matrice d'interaction de la première et de la seconde matrice colonne, sont donnés par :

10

$$\begin{aligned} c_{i,j} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \overline{M_i S_j}} \\ v_j &= q_j \\ V(M_i) &= U_i \end{aligned} \quad [3]$$

où :

- ϵ_0 est une constante diélectrique,
- $\overline{M_i S_j}$ est une distance mesurée en valeur algébrique,
- 15 - q_j correspond à une charge électrique caractérisant une source S_j , et
- U_i correspond à un potentiel électrique au point M_i .

20 Dans le cas de la propagation d'une onde magnétique, l'expression de ces coefficients est la suivante :

$$\begin{aligned} c_{i,j} &= \frac{1}{2\pi\mu_0 \overline{M_i S_j}} \\ v_j &= \varphi_j \\ V(M_i) &= \theta_i \end{aligned} \quad [4]$$

où :

- μ_0 correspond à la perméabilité magnétique du milieu où se situe le point M_i ,
- 5 - φ_j correspond au flux magnétique associé à la source S_j ;
- θ_i correspond au potentiel magnétique au point M_i .

Dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore,
10 ces coefficients sont donnés par :

$$C_{i,j} = -\frac{i\omega\rho}{2\pi} \frac{\exp(i\vec{k} \cdot \vec{M_i S_j})}{M_i S_j} \cdot dS_j$$

$$\vec{v}_j = \vec{v_j} \quad [5]$$

$$V(M_i) = p_i$$

dans laquelle :

- 15 - $i^2 = -1$.
- ω est la pulsation de l'onde sonore ;
- ρ est la densité du milieu dans lequel se situe le point M_i ;
- le vecteur $\vec{v_j}$ correspond à la vitesse sonore issue de
- 20 la source S_j ;
- \vec{k} correspond au vecteur d'onde de l'onde sonore ; et
- p_i correspond à la pression acoustique générée par la propagation de l'onde ultrasonore au point M_i .

Dans l'expression des coefficients $c_{1,j}$, le terme dS_j correspond à la surface de l'échantillon associé à la source S_j . De préférence, le maillage d'une surface au sens de l'étape a) du procédé selon l'invention, est
5 choisi de sorte que chaque maille comporte une même surface $dS=dS_1=dS_2=...=dS_j$.

On remarque en particulier dans l'expression des coefficients $c_{1,j}$ qu'ils dépendent du produit scalaire
10 entre le vecteur d'onde et le vecteur $\overline{M_1S_j}$. Ainsi, pour des ondes ultrasonores, on tient compte d'un déphasage entre les chemins qui lient chaque source S_j à un point de l'espace tridimensionnel M , ce déphasage étant dû à une différence de marche entre les rayons partant de chaque
15 source et arrivant au point M (comme le montre la figure 4A). En particulier, on comprendra que l'angle d'incidence d'un tel rayon est pris en compte dans l'expression des coefficients de la matrice d'interaction F .

Bien entendu, dans le cadre de la propagation d'une onde électromagnétique de fréquence élevée, donc de longueur d'onde courte, qui diffère du cadre électrostatique ou magnétostatique ci-avant, on tient compte du terme de
20 propagation $\exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$ dans l'expression de la matrice d'interaction, par rapport à la géométrie du problème à résoudre, comme dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore ci-avant (relation [5]).
25

Ainsi, le système matriciel de l'équation [1] permet
30 d'estimer, à partir d'une matrice d'interaction F et d'un

vecteur comportant les valeurs v_j associées aux sources S_j , les coefficients d'un vecteur (matrice colonne) comportant les valeurs de grandeur physique $V(M_i)$ aux points de l'espace M_i .

5

Pour déterminer les valeurs des sources v_j , on applique le système matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} V(P_1) \\ V(P_2) \\ \vdots \\ V(P_N) \end{pmatrix} = F \times \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} \quad [6]$$

10

où :

- les coefficients de la matrice d'interaction F s'expriment par avec $C_{ij}=f(RS_j)$
- les indices i et j correspondent respectivement à la $i^{\text{ème}}$ ligne et la $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice d'interaction F . Cette matrice d'interaction comporte, pour la détermination des valeurs associées aux sources v_j , N lignes et N colonnes, en rappelant que N est le nombre total de mailles à la surface de l'obstacle ;
- les points P_i correspondent au sommet des hémisphères HEM_i de la figure 1B.

15

20

25

La mise en œuvre de l'étape c) du procédé au sens de la présente invention correspond à calculer une condition aux limites pour les points P_i , de propriétés connues, comme on le verra plus loin.

Le système matriciel de l'équation [6] devient alors :

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} = F^{-1} \times \begin{pmatrix} V(P_1) \\ V(P_2) \\ \vdots \\ V(P_N) \end{pmatrix} \quad [7]$$

5 où :

- F^{-1} correspond à l'inverse de la matrice d'interaction F ; et
- les valeurs $V(P_i)$ sont prédéterminées, en fonction des conditions aux limites précitées.

10

On détermine ainsi les valeurs de source v_j .

A partir de l'estimation de ces valeurs de source v_j , on peut calculer la grandeur physique scalaire en un point M
 15 quelconque de l'espace tridimensionnel, à partir de la relation :

$$V(M) = \sum_{j=1}^N f(MS_j) v_j \quad [8]$$

20 Pour obtenir cette expression de la grandeur scalaire $V(M)$, la matrice d'interaction F peut ne comporter qu'une ligne de coefficients c_j , avec :

$$C_j = f(MS_j) ,$$

mais comporte toujours N colonnes.

25

En se référant à nouveau à la figure 1A, on comprendra que la surface de l'obstacle OBS recevant l'onde qu'émet

l'élément rayonnant ER agit, elle-même, comme une surface active ré-émettant une onde secondaire (par exemple par réflexion). Chaque source S_i représente une contribution à l'émission de cette onde secondaire.

5

En outre, pour tenir compte à la fois de la présence de l'onde principale et de la présence de l'onde secondaire au point M, on estime la contribution de l'onde principale et la contribution de l'onde secondaire au point M par le système matriciel :

10

$$V(M) = F \times \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} + F' \times \begin{pmatrix} v'_1 \\ v'_2 \\ \vdots \\ v'_{N'} \end{pmatrix} \quad [9]$$

où :

- 15 - F' est la matrice d'interaction entre la surface de l'élément rayonnant et le point M ;
- v'_j (avec $j=1,2,3,\dots,N'$) est la valeur des sources attribuées à chaque échantillon de surface dS'_j de l'élément rayonnant, N' étant le nombre total de
- 20 mailles choisi pour la surface active de l'élément rayonnant ER.

Les coefficients de la matrice F' sont encore fonction de la distance MS'_j , où S'_j sont les sources affectées à

25 chaque échantillon de surface dS'_j de l'élément rayonnant.

Selon une caractéristique avantageuse, les valeurs des sources de l'obstacle v_j sont déterminées en fonction des

valeurs des sources de l'élément rayonnant v'_j , lesquelles sont elles-mêmes calculées comme on le verra plus loin en référence aux figures 4A, 4B, 5A et 5B.

- 5 On se réfère maintenant à la figure 2A, dans laquelle on affecte trois sources à chaque échantillon de surface dS_i , en vue d'estimer une grandeur physique vectorielle $\overline{V(M)}$, en un point M de l'espace tridimensionnel.
- 10 En effet, on comprendra que pour estimer la grandeur vectorielle, par ses trois coordonnées dans l'espace x, y et z, le nombre d'équations à résoudre par rapport au système matriciel précédent doit être multiplié par trois. Ainsi, la matrice F^{-1} de la relation [7] doit comporter
- 15 trois fois plus de lignes que précédemment. La matrice d'interaction F doit, elle-même, comporter trois fois plus de colonnes que précédemment et, à cet effet, on prévoit avantageusement trois sources par maille lorsqu'il s'agit de déterminer les coordonnées dans l'espace
- 20 tridimensionnel d'un vecteur $\overline{V(M)}$.

- En se référant à la figure 2B, les trois sources SA_i , SB_i , SC_i , attribuées à un échantillon de surface dS_i sont de positions respectives déterminées comme on l'indique ci-
- 25 après. Telles que représentées sur la figure 2B, les trois sources SA_i , SB_i , SC_i sont coplanaires et le plan comportant ces trois sources comporte en outre la base de l'hémisphère HEM_i . L'hémisphère HEM_i est construit comme indiqué ci-avant (de même surface que la surface de la
- 30 maille), avec toutefois le centre de l'hémisphère qui

correspond ici au barycentre des trois sources SA_1 , SB_1 et SC_1 .

5 On entend par "centre de l'hémisphère" le centre du disque qui constitue la base de l'hémisphère.

Les trois sources qui sont attribuées à l'échantillon de surface dS_1 sont disposées aux sommets d'un triangle équilatéral dont le barycentre G_1 correspond au centre de
10 l'hémisphère. De préférence, chaque source SA_1 , SB_1 et SC_1 est disposée sur le milieu d'un rayon R_1 de l'hémisphère. Ainsi, les droites qui relient le barycentre G_1 à chaque source sont écartées angulairement de 120° .

15 En se référant à la figure 2C, l'orientation angulaire des triangles que forment les triplets de sources est choisie aléatoirement, d'un échantillon de surface à l'autre. Avantageusement, on évite ainsi des artefacts de sur-périodicité, dans l'estimation de la grandeur vectorielle
20 au point M, qui pourraient résulter du choix d'une même orientation angulaire de ces triangles.

En référence avec les différents types d'ondes indiqués précédemment, la grandeur vectorielle $\vec{V}(M)$ à estimer peut
25 être :

- un champ électrique, dans le cadre de la propagation d'une onde électrique ;
- un champ magnétique, dans le cadre de la propagation d'une onde magnétique ; et
- 30 - une vitesse du son au point M, dans le cadre de la propagation d'ondes ultrasonores.

Pour déterminer les valeurs associées à chaque source SA_i , SB_i , SC_i , on met en forme le système matriciel selon la relation suivante :

5

$$\begin{pmatrix} V_x(P_1) \\ V_x(P_2) \\ \vdots \\ V_x(P_N) \\ V_y(P_1) \\ V_y(P_2) \\ \vdots \\ V_y(P_N) \\ V_z(P_1) \\ V_z(P_2) \\ \vdots \\ V_z(P_N) \end{pmatrix} = F_{\bar{V}} \times \begin{pmatrix} vA_1 \\ vA_2 \\ \vdots \\ vA_N \\ vB_1 \\ vB_2 \\ \vdots \\ vB_N \\ vC_1 \\ vC_2 \\ \vdots \\ vC_N \end{pmatrix} \quad [11]$$

On remarque, en particulier, que la matrice d'interaction $F_{\bar{V}}$ est de dimensions $3N \times 3N$, où N est le nombre total d'échantillons de surface. La matrice d'interaction s'exprime ici par la relation :

10

$$F_{\bar{V}} = \begin{pmatrix} \overbrace{N \{ C_A^x(i,j) }^N & \overbrace{C_B^x(i,j)}^N & \overbrace{C_C^x(i,j)}^N \\ N \{ C_A^y(i,j) & C_B^y(i,j) & C_C^y(i,j) \\ N \{ C_A^z(i,j) & C_B^z(i,j) & C_C^z(i,j) \end{pmatrix} \quad [12]$$

Les coefficients de cette matrice s'expriment par :

$$C_{\sigma}^u(i,j) = f_u[d(P_i, S\sigma_j)] \quad [13]$$

5 avec $\sigma = A, B, C$
 $i = 1, 2, \dots, N$
 $j = 1, 2, \dots, N$
 $u = x, y, z.$

10 et sont encore fonction d'une distance séparant le point de contact P_i de l'une des sources $S\sigma_j$ ($\sigma = A, B$ ou C) d'un triplet associé à un échantillon de surface dS_j .

Par inversion de la matrice d'interaction $F_{\bar{V}}$, on
 15 détermine ainsi les valeurs $v\sigma_j$ associées à chaque source $S\sigma_j$, en appliquant des conditions aux limites sur les valeurs du vecteur \bar{V} aux points P_i . Ces conditions aux limites imposent une valeur du vecteur \bar{V} , selon ses trois coordonnées $V_x(P_i)$, $V_y(P_i)$ et $V_z(P_i)$.

20

Une fois que ces valeurs de sources $v\sigma_j$ sont ainsi déterminées, on calcule facilement l'expression du vecteur \bar{V} en un point quelconque M de l'espace, par la relation :

$$25 \quad \bar{V}(M) = V_x(M) \bar{x} + V_y(M) \bar{y} + V_z(M) \bar{z} \quad [14]$$

$$V_x(M) = \sum_{\substack{j=1, \dots, N \\ \sigma=A, B, C}} f_x[d(M, S\sigma_j)] \cdot v\sigma_j$$

$$V_y(M) = \sum_{\substack{j=1,\dots,N \\ \sigma=A,B,C}} f_y[d(M, S\sigma_j)] \cdot v\sigma_j$$

$$V_z(M) = \sum_{\substack{j=1,\dots,N \\ \sigma=A,B,C}} f_z[d(M, S\sigma_j)] \cdot v\sigma_j$$

5 \bar{x} , \bar{y} et \bar{z} correspondent à des vecteurs unitaires portés par les axes x, y et z de l'espace tridimensionnel.

Ainsi, la matrice d'interaction $F_{\bar{V}}$, lorsqu'elle est appliquée à un point quelconque M de l'espace, ne comporte
10 finalement que trois lignes associées chacune à une coordonnée de l'espace x, y ou z.

Pour différents types d'ondes, les valeurs des sources $v\sigma_j$ sont, comme précédemment, une charge électrique pour une
15 onde électrique, un flux magnétique pour une onde magnétique, une vitesse du son pour une onde ultrasonore.

Plus précisément, les coefficients de la matrice d'interaction $F_{\bar{V}}$ se déterminent à partir des relations
20 [3], [4] et [5] précédentes en précisant toutefois que :

$$\bar{V}(M) = -\overline{\text{grad}}[V(M)] \quad [15]$$

V(M) étant la grandeur scalaire calculée précédemment par
25 l'équation [8].

Ainsi, pour l'estimation d'une grandeur vectorielle \vec{V} au point M et pour les types d'onde cités ci-avant à titre d'exemple (électrique, magnétique et ultrasonore), les coefficients de la matrice d'interaction $F_{\vec{V}}$ sont
5 inversement proportionnels au carré d'une distance séparant chaque source du point M, alors que pour l'estimation d'une grandeur scalaire V en un point M de l'espace, les coefficients de la matrice d'interaction F sont simplement inversement proportionnels à cette
10 distance. Chaque distance implique l'une des sources d'un triplet d'un échantillon de surface et un point M de l'espace. La matrice d'interaction $F_{\vec{V}}$ comporte alors 3N colonnes lorsqu'il s'agit de prendre trois sources par échantillon de surface, alors que la matrice d'interaction
15 F pour l'estimation de la grandeur scalaire ne comportait que N colonnes puisque seule une source par échantillon de surface était nécessaire.

Plus généralement, on attribue une source par échantillon
20 lorsque l'on connaît des conditions aux limites pour une grandeur scalaire et trois sources par échantillon lorsque l'on connaît plutôt des conditions aux limites pour une grandeur vectorielle.

25 On se réfère maintenant à la figure 3A pour décrire, à titre illustratif, une application du procédé selon l'invention à l'estimation d'un potentiel électrique en un point M de l'espace tridimensionnel, situé entre deux armatures d'un condensateur. Les armatures de ce
30 condensateur sont portées à des potentiels respectifs V1

et V2. La mise en œuvre de l'étape a) consiste d'abord à
mailler les surfaces respectives des deux armatures. Dans
l'exemple représenté sur la figure 3A, on n'a représenté
que deux mailles pour chaque armature, simplement à titre
5 illustratif.

L'application de l'étape b) consiste à mettre en forme le
système matriciel impliquant la matrice d'interaction F et
le vecteur colonne comportant les valeurs des sources S₁ à
10 S₄. La multiplication de ces deux matrices permet
d'obtenir un vecteur colonne comportant les valeurs du
potentiel en un ou plusieurs points M de l'espace.

La mise en œuvre de l'étape c) du procédé selon
15 l'invention consiste à appliquer le système matriciel aux
points de contact des hémisphères P₁ à P₄, de chaque
échantillon de surface dS₁ à dS₄. Il en résulte la
relation suivante :

$$\begin{matrix} 20 \end{matrix} \quad \begin{pmatrix} V(P_1) \\ V(P_2) \\ V(P_3) \\ V(P_4) \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{pmatrix} \frac{1}{P_1S_1} & \frac{1}{P_1S_2} & \frac{1}{P_1S_3} & \frac{1}{P_1S_4} \\ \frac{1}{P_2S_1} & \frac{1}{P_2S_2} & \frac{1}{P_2S_3} & \frac{1}{P_2S_4} \\ \frac{1}{P_3S_1} & \frac{1}{P_3S_2} & \frac{1}{P_3S_3} & \frac{1}{P_3S_4} \\ \frac{1}{P_4S_1} & \frac{1}{P_4S_2} & \frac{1}{P_4S_3} & \frac{1}{P_4S_4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} \quad [16]$$

avec

$$\begin{aligned}
 V(P_1) &= V(P_2) = V_1 \\
 V(P_3) &= V(P_4) = V_2 \\
 V_1 &= q_1, \quad v_2 = q_2, \quad v_3 = q_3, \quad v_4 = q_4
 \end{aligned}$$

Ici, la condition aux limites impose que la valeur du potentiel aux points de contact P_1 et P_2 correspond au potentiel V_1 de la première armature. De même, le potentiel électrique aux points de contact P_3 et P_4 correspond au potentiel électrique de la seconde armature V_2 . Par inversion de la matrice d'interaction appliquée au point de contact P_1 , on détermine les valeurs des sources v_1 qui correspondent, comme exprimé dans la relation [16], à des charges électriques q_1 .

10

Les coefficients de la matrice d'interaction $\frac{1}{2\pi\epsilon_0 P_i S_j}$ sont parfaitement connus, puisque les positions des sources S_j et les positions des points de contact P_i sont déterminées au préalable, comme représenté sur la figure 1B.

15

L'expression du potentiel électrique $V(M)$ au point M entre les deux armatures est finalement donnée par l'expression :

$$V(M) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{MS_1} + \frac{q_2}{MS_2} + \frac{q_3}{MS_3} + \frac{q_4}{MS_4} \right) \quad [17]$$

20

On se réfère maintenant à la figure 3B sur laquelle on a représenté les mêmes armatures que sur la figure 3A, avec sensiblement un même maillage, mais dans le but, ici, d'estimer une grandeur vectorielle correspondant au champ électrique $\overline{E(M)}$, au point M de l'espace tridimensionnel.

25

On peut appliquer les relations [11] à [15] pour estimer la valeur du champ électrique au point M, avec, dans la relation [13] :

$$5 \quad C_{\sigma}^u(i,j) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0 d^2(P_i, S_{\sigma_j})} \right)_u \quad [18]$$

avec

$$\sigma = A, B, C$$

$$u = x, y, z$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

$$10 \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

Toutefois, les valeurs du champ électrique au point de contact P_i restent à déterminer dans la relation [11].

15 On introduit alors une loi générale prédéterminée du comportement du champ (en réflexion, en transmission, ou autre) au niveau de la surface de l'obstacle (des armatures dans l'exemple du condensateur précité), pour connaître les valeurs des sources V_{σ_j} .

20

Par exemple, si l'onde électrique est totalement réfléchie par la surface d'un obstacle (par exemple l'une des deux armatures), le champ électrique en un point de contact P_i est normal à la surface dS_i et ses composantes E_x et E_y sont nulles. A titre illustratif, si la surface de l'armature n'était représentée que par un seul échantillon de surface à trois sources, les valeurs de ses sources v_A , v_B et v_C seraient toutes égales entre elles à une même valeur $+q$.

25

Au contraire, si le coefficient de réflexion est pratiquement nul à la surface dS_1 , la composante du champ électrique E_z au point P_i est nulle, ce qui correspond
5 bien au cas où le champ est sensiblement tangent à la surface dS_1 . Ainsi, à titre illustratif, si la surface de l'armature n'était représentée que par un seul échantillon de surface à trois sources, les valeurs de ses sources vA , vB et vC seraient respectivement, par exemple, $+q$, $+q$ et
10 $-2q$. Par exemple, dans le cadre de la propagation d'une onde magnétique, si la surface d'un capteur à courants de Foucault (avec une composante normale du champ magnétique nulle) était représentée par un unique échantillon de surface, les flux magnétiques des trois sources associées
15 à cet échantillon de surface seraient $+\varphi$, $+\varphi$ et -2φ .

On comprend ainsi qu'avec les trois sources par échantillon dS_1 , on peut définir, par exemple en fonction de la pondération de chaque source, une orientation
20 quelconque du champ à la surface de l'obstacle.

Bien entendu, cette démarche suppose que le coefficient de réflexion R d'un obstacle soit connu auparavant. En particulier, il peut être avantageux de comparer une
25 simulation et une mesure expérimentale pour détecter, à la surface d'un obstacle, des inhomogénéités ou des impuretés qui correspondent à des points de la surface de cet obstacle qui ne vérifient pas les valeurs du coefficient de réflexion R imposées à chaque point prédéterminé P_i de
30 l'obstacle.

On peut affecter ainsi une valeur prédéterminée du coefficient de réflexion à chaque point P_i de la surface de l'obstacle. A cet effet, on introduit une matrice R qui est représentative du coefficient de réflexion en chaque point P_i . Pour une interaction entre un élément rayonnant et un obstacle, on peut ainsi exprimer le système matriciel de la relation [9] autrement, c'est-à-dire en donnant une expression unique de toutes les sources du système (à la fois de l'obstacle et de l'élément rayonnant), comme indiqué ci-après.

Dans ce qui suit, on indique que :

- $F(P)$ est la matrice d'interaction de l'obstacle OBS appliquée aux points P_i de la surface de l'obstacle OBS ;
- $F(P')$ est la matrice d'interaction de l'obstacle OBS appliquée aux points P'_i de la surface de l'élément rayonnant ER;
- $F'(P)$ correspond à la matrice d'interaction de l'élément rayonnant ER appliquée aux points P_i de la surface de l'obstacle OBS ;
- $F'(P')$ correspond à la matrice d'interaction de l'élément rayonnant ER appliquée aux points P_i de la surface de l'élément rayonnant ER ;
- \vec{v}' correspond au vecteur colonne comportant les valeurs des sources S'_i de l'élément rayonnant ER ; et
- \vec{v} correspond au vecteur colonne comportant les valeurs des sources S_i de l'obstacle OBS.

Sur l'obstacle, la contribution de l'onde émise par l'élément rayonnant ER s'exprime par :

$$\tilde{V}'(P) = F'(P) \cdot \tilde{v}' \quad [19]$$

5

La contribution de l'onde secondaire renvoyée par l'obstacle OBS s'exprime, par définition, par la relation :

$$\tilde{V}(P) = F(P) \cdot \tilde{v} \quad [20]$$

10

Or, dans l'exemple représenté sur la figure 4A, l'onde secondaire correspond simplement à une réflexion de l'onde principale. Ce qui s'exprime par la relation :

15

$$\tilde{V}(P) = R \tilde{V}'(P) \quad [21]$$

20

où R correspond à une matrice de réflexion dont chaque coefficient représente la contribution à l'émission, par réflexion, de l'onde secondaire, par chaque source S_i (ou $S_{\sigma i}$, dans le cadre d'une estimation d'une grandeur vectorielle) de l'obstacle OBS.

25

Des trois relations [19], [20] et [21], on déduit l'expression du vecteur colonne \tilde{v} comportant les valeurs des sources de l'obstacle, à partir du vecteur colonne \tilde{v}' comportant les valeurs des sources de l'élément rayonnant, par la relation :

30

$$\tilde{v} = [F(P)]^{-1} \cdot R \cdot [F'(P)] \cdot \tilde{v}' \quad [22]$$

Par ailleurs, pour une estimation fine des grandeurs scalaires ou vectorielles au point \bar{M} , notamment pour tenir compte de réflexions multiples, il est avantageux de tenir
 5 compte de la contribution du rayonnement par l'obstacle, au niveau de la surface de l'élément rayonnant ER. A cet effet, on tient compte, dans l'estimation des conditions aux limites à la surface de l'élément rayonnant ER (aux points P'_i) de la contribution du rayonnement des sources
 10 S'_i de l'élément rayonnant et de la contribution de l'émission de l'onde secondaire par les sources S_i de l'obstacle, par la relation :

$$\vec{V}_T(P') = F(P') \vec{v} + F'(P') \vec{v}' \quad [23]$$

15

On peut ainsi ajuster, grâce à la relation [23], les valeurs de sources S'_i de l'élément rayonnant ER, en tenant compte de la réflexion de l'obstacle OBS, selon la relation suivante :

20

$$\vec{V}_T(P') = \left\{ F(P') \cdot [F(P)]^{-1} \cdot R \cdot [F'(P)] + F'(P') \right\} \cdot \vec{v}' \quad [10]$$

Ainsi, on impose simplement des conditions aux limites pour l'élément rayonnant, pour en déduire les valeurs des
 25 sources v'_i . En pratique, on procèdera préférentiellement comme suit :

- après maillage des surfaces, on détermine la position des points P_i et P'_i et des sources S_i et S'_i ;
- en fonction du type d'onde en jeu, on détermine les
 30 coefficients des matrices $F(P)$, $F'(P)$, $F(P')$ et $F'(P')$;

- en fonction d'une loi de réflexion de l'obstacle, on détermine les coefficients de la matrice de réflexion comme dans l'exemple donné plus loin pour une onde ultrasonore;
- 5 - en fonction de conditions aux limites sur l'élément rayonnant (dont le comportement est généralement connu pour un problème donné), on détermine les valeurs du vecteur $\vec{V}_i(P')$ aux points P'_i de la surface de l'élément rayonnant et on en déduit les valeurs des sources S'_i de
10 l'élément rayonnant par inversion de la relation [10];
 - on en déduit aussi les valeurs des sources S_i de l'obstacle par application de la relation [22];
 - une fois les valeurs de toutes les sources S_i et S'_i déterminées, on peut appliquer le système matriciel donné
15 par la relation [9] à tout point M de l'espace, en appliquant à ce point M les matrices d'interaction F et F' (impliquant la position du point M et les positions des sources respectives S_i et S'_i).
- 20 En se référant à nouveau à la figure 4A, on considère que l'obstacle OBS représente simplement une interface entre deux milieux M1 et M2, formant ainsi un dioptre qui peut être plan, tel que représenté dans l'exemple de la figure 4A, mais aussi incurvé ou de forme générale quelconque.
- 25 Les coefficients de réflexion R_i associés à chaque point P_i dépendent, dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore ou électromagnétique de haute fréquence, de l'angle d'incidence β_i du rayon issu de la source S_i , au point de l'espace tridimensionnel M.

Pour une onde ultrasonore, l'expression des coefficients de réflexion R_i est donnée par :

$$R_i = \frac{\rho_2 c_2 \cos \beta_i - \rho_1 c_1 \left[1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} + \frac{c_2^2}{c_1^2} \cos^2 \beta_i \right]^{1/2}}{\rho_2 c_2 \cos \beta_i + \rho_1 c_1 \left[1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} + \frac{c_2^2}{c_1^2} \cos^2 \beta_i \right]^{1/2}} \quad [24]$$

5

où :

- c_1 est la vitesse du son dans le milieu M_1 ;
- c_2 est la vitesse du son dans le milieu M_2 ;
- ρ_1 est la densité du milieu M_1 ;
- 10 - ρ_2 est la densité du milieu M_2 .

Dans cette expression [24], le terme $\cos \beta_i$ peut simplement être estimé en fonction des coordonnées dans l'espace du point M et du point représentant la source S_1 .

- 15 En se référant maintenant à la figure 4B, la même estimation peut être menée pour un point M situé dans le milieu M_2 . Dans ce cas, l'onde que reçoit le point M est une onde transmise par l'obstacle OBS. En particulier, on remarque que les sources de l'élément rayonnant ER ne sont
- 20 plus actives, du fait de l'occultation de l'élément rayonnant ER par l'obstacle OBS. En transmission, le raisonnement s'applique comme précédemment avec une condition aux limites imposée aux points P_i par les valeurs des coefficients de transmission T_i associés à
- 25 chaque point P_i . Dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore, chaque coefficient de transmission T_i est donné par la relation :

$$T_i = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \beta_i}{\rho_2 c_2 \cos \beta_i + \rho_1 c_1 \left[1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} + \frac{c_2^2}{c_1^2} \cos^2 \beta_i \right]^{1/2}} \quad [25]$$

5 Comme indiqué précédemment, les termes $\cos \beta_i$ peuvent être déterminés en fonction des coordonnées respectives des sources S_i et du point M.

10 Pour estimer les valeurs de sources S_i de l'obstacle OBS, on applique la relation [22] en remplaçant toutefois la matrice de réflexion R par la matrice de transmission T :

$$\bar{v} = [F(P)]^{-1} T[F'(P)] \bar{v}' \quad [26]$$

15 Dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore, les coefficients des matrices R et T s'estiment pour chaque source S_i et pour chaque point P_i . En particulier, chaque coefficient $T_{i,j}$ ou $R_{i,j}$ de la matrice T ou de la matrice R (où i correspond à la $i^{\text{ème}}$ ligne et j correspond
20 à la $j^{\text{ème}}$ colonne) s'exprime en fonction d'un angle β_{ij} entre une normale à la surface de l'obstacle au point P_i et une droite passant par le point P_i et par une source S_j . On peut écrire ainsi, de manière générale, les deux relations exprimant les valeurs des coefficients des
25 matrices T et R par les relations respectives suivantes :

$$T_{i,j} = f_t(\cos \beta_{ij}) \quad [27]$$

$$R_{i,j} = f_r (\cos \beta_{ij}) \quad [28]$$

où f_t est donné par la relation [25] et f_r est donné par la relation [24].

5

De façon plus générale, en référence aux figures 4A et 4B, on indique que, si l'on considère l'obstacle comme un matériau plein représentant un milieu M2 distinct d'un milieu M1 dans lequel se propageait initialement l'onde principale :

10

- pour une réflexion de l'onde principale sur l'obstacle en tant que milieu M2 (la surface de l'obstacle formant dioptre entre les milieux M1 et M2), les hémisphères HEM_1 sont orientés vers l'extérieur de l'obstacle (figure 4A) ;

15

- pour une transmission de l'onde principale dans l'obstacle, les hémisphères HEM_1 sont orientés vers l'intérieur de l'obstacle (figure 4B).

20

On se réfère maintenant à la figure 5A pour décrire le cas d'un l'obstacle plan OBS de dimensions finies, excité par un élément rayonnant ER, incliné d'un angle prédéterminé par rapport à l'obstacle OBS. Comme indiqué précédemment, pour une onde ultrasonore, on prendra en compte l'inclinaison de l'élément rayonnant pour calculer la contribution de l'onde émise par l'élément rayonnant au point M. Par ailleurs, de façon particulièrement avantageuse, on maille une surface qui englobe la surface de l'obstacle (figure 5A). Pour une tranche de l'espace délimitée par l'élément rayonnant, d'une part, et l'obstacle, d'autre part (figure 5A), on peut considérer

30

trois types de sources :

- les sources S'_i de l'élément rayonnant ER,
- des sources SO_i , qui renvoient l'onde secondaire, par réflexion de l'obstacle OBS, en fonction d'un certain coefficient de réflexion R de l'obstacle ; et
- 5 - des sources SS_i , qui ne renvoient pas d'onde secondaire et auxquelles un coefficient de réflexion nul peut être attribué si l'obstacle sépare deux milieux d'indices identiques. Dans ce cas, ces sources SS_i sont considérées comme "éteintes" dans la tranche de
- 10 l'espace précitée et ne sont pas prises en compte dans les calculs de la grandeur physique au point M de la figure 5A. En revanche, ces sources SS_i peuvent être actives par réflexion de l'onde principale si l'obstacle OBS sépare deux milieux d'indices
- 15 différents.

Par ailleurs, pour estimer les grandeurs scalaires ou vectorielles associées à un point M d'un demi-espace délimité par la surface englobant l'obstacle OBS (à droite

20 de la figure 5B), on considère :

- les sources SO'_i de l'obstacle, actives par transmission de l'onde principale, et
- les sources SS_i , auxquelles on affecte maintenant un coefficient de transmission égal à 1 si l'obstacle
- 25 sépare deux milieux de mêmes indices. Ces sources SS_i se comportent finalement (aux angles d'incidence près) comme les sources S'_i de l'élément rayonnant ER.

Les sources S'_i de l'élément rayonnant peuvent alors être "éteintes" pour le calcul des grandeurs physiques dans ce

30 demi-espace.

Pour calculer les valeurs \bar{v}' des sources S'_i de l'élément rayonnant (desquelles sont déduites les valeurs \bar{v} des sources de l'obstacle selon les relations [22] et [26]), on appliquera simplement des conditions aux limites aux points de la surface active de l'élément rayonnant ER. Par exemple, pour une propagation d'onde ultrasonore, on peut indiquer que les vitesses sonores aux points de la surface de l'élément rayonnant ER sont perpendiculaires à cette surface et de modules v_0 égaux entre eux.

10

De manière générale, on indique que l'espace tridimensionnel peut être ainsi découpé par des interfaces délimitant des milieux de propriétés distinctes, chaque interface représentant un obstacle au sens de la présente invention. On calcule alors les grandeurs physiques dans chaque tranche de l'espace. Par exemple, dans le cadre de l'étude d'une hétérostructure (à plusieurs interfaces), on peut appliquer le procédé ci-avant pour des tranches successives de l'espace en considérant deux interfaces : l'une représentant un "élément rayonnant" au sens des figures 4A et 5A, par exemple par transmission d'une onde reçue, et l'autre représentant un obstacle recevant l'onde transmise. Avantageusement, on tient compte, pour chaque tranche de l'espace, des contributions de toutes les interfaces comme exprimé par les relations [10] et [22].

25

Toutefois, dans une réalisation pratique préférée, en particulier pour programmer la simulation d'une interaction, on considérera avantageusement tous les obstacles de tout l'espace autour d'un point M et l'on

30

imposera une condition sur la position du point M par rapport à chaque source présente dans l'espace.

Préférentiellement, en référence à la figure 7A, on teste
 5 le produit scalaire $\overrightarrow{SM} \cdot \vec{r}$ à chaque itération par rapport à une source S, par exemple sous la forme :

$$\frac{\overrightarrow{SM} \cdot \vec{r}}{\|\vec{r}\| \cdot \|\overrightarrow{SM}\|} = \cos \theta$$

où \vec{r} est le vecteur reliant la source S au point de
 contact P de la demie sphère avec l'élément de surface dS
 10 considéré, dans le cas où l'on prévoit une seule source par hémisphère. Dans le cas où l'on prévoit plutôt un triplet de sources S1, S2, S3, la base du vecteur \vec{r} est
 préférentiellement située au barycentre des trois sources
 S1, S2, S3. D'ailleurs, dans le cas de trois sources par
 15 échantillon de surface, le calcul du produit scalaire concerne chaque source Si du triplet S1, S2, S3.

Typiquement, si $\cos \theta$ est positif, on tient compte de la
 contribution de cette source S dans l'estimation de
 20 l'interaction.

En revanche, si $\cos \theta$ est négatif, on affecte une valeur
 (scalaire ou vectorielle) nulle à cette source S dans
 l'estimation de l'interaction.

25

En variante du calcul du produit scalaire ci-avant, on
 peut calculer une "altitude" du point M. Dans ce cas, le
 test porte sur une grandeur du type :

$$\frac{\overrightarrow{SM} \cdot \vec{r}}{\|\vec{r}\|}$$

Bien entendu, d'autres types de tests sont possibles. Par
5 exemple, dans le cas d'un calcul par rapport à l'angle θ ,
on peut choisir cet angle dans un cône d'ouverture
choisie, ou autre.

10 Finalement, cette démarche permet avantageusement de
systématiser une configuration quelconque des sources par
rapport au point d'observation M, en introduisant
simplement une étape supplémentaire de test, à chaque
itération sur une source S, de la position de cette source
S par rapport au point M, comme indiqué ci-avant.

15 Cette démarche s'avère particulièrement avantageuse pour
des surfaces à mailler qui sont relativement complexes,
notamment lorsque le point d'observation M est susceptible
de se situer dans une zone d'ombre par rapport à certaines
20 sources, comme le montre la figure 7B. Sur cette figure
7B, on a représenté en traits pointillés les demi-sphères
associées aux sources dans la zone d'ombre du point
d'observation M, et pour lesquelles, par conséquent, la
contribution est fixée comme étant nulle dans
25 l'interaction estimée. Bien entendu, dans le cas où une
source est écrantée par une surface échantillonnée, bien
que le produit scalaire $\overrightarrow{SM} \cdot \vec{r}$ associé à cette source reste
positif, un second test détermine si le vecteur \overrightarrow{SM}
traverse ou non une surface échantillonnée. Dans

l'affirmative, cette source est considérée comme inactive spécifiquement pour la région du point M.

Ainsi, en termes plus généraux, le procédé au sens de l'invention prévoit préférentiellement au moins une étape supplémentaire, pour chaque échantillon de surface, de test de la valeur d'un produit scalaire entre :

- un premier vecteur \vec{r} normal à l'échantillon de surface et dirigé vers le sommet P de l'hémisphère, tel que représenté sur la figure 7A, et

- un second vecteur \overrightarrow{SM} tiré entre une source S associée à cet hémisphère et le point M qui se situe dans la région d'observation,

en distinguant, en particulier :

- le cas où ce produit scalaire est inférieur à un seuil prédéterminé et la contribution de cette source n'est pas prise en compte, et
- le cas où ce produit scalaire est supérieur à un seuil prédéterminé et la contribution de cette source est effectivement prise en compte.

Dans l'exemple ci-avant où l'on considère l'angle θ entre ces deux vecteurs, le seuil prédéterminé précité est bien entendu la valeur 0 et l'on distingue simplement les cas où le produit scalaire est positif ou négatif.

Bien entendu, ce choix n'est pas limitatif de sorte que pour une hétérostructure à plusieurs dioptries parallèles, on pourra encore considérer, de façon avantageuse, des

semi-espaces successifs, comme décrit ci-avant en référence aux figures 4A et 4B.

La simulation de la figure 5C correspond, pour une onde ultrasonore, à la situation des figures 5A et 5B en tenant compte :

- de la contribution de l'émission de l'onde principale par l'élément rayonnant ER ;
- de la contribution de la réflexion de cette onde principale par l'obstacle ; et
- de la contribution de la transmission de l'onde principale par l'obstacle.

Les lignes de niveau de la figure 5C correspondent à différents paliers de pression acoustique. L'élément rayonnant ER est disposé à 10 mm de l'obstacle OBS et incliné de 20° par rapport à ce dernier. On remarque en particulier des franges d'interférences dans une zone entre l'obstacle OBS et l'élément rayonnant ER. Une telle simulation peut avantageusement indiquer une position idéale d'un capteur ultrasonore. Ces capteurs ultrasonores comportent habituellement un transducteur comme élément rayonnant actif et un détecteur pour mesurer les ondes ultrasonores reçues. La simulation de la figure 5C peut ainsi indiquer en outre la forme idéale d'un capteur ultrasonore, selon les applications souhaitées, pour une forme d'obstacle donnée.

La simulation de la figure 5C a été effectuée grâce à un calcul matriciel programmé à l'aide du logiciel de calcul MATLAB®. Le nombre de mailles total choisi pour

l'obstacle et pour l'élément rayonnant (ici, quelques centaines en tout) est alors optimisé :

- d'une part, pour limiter la durée des calculs ; et
- d'autre part, pour que la taille des mailles reste
5 inférieure à une demie longueur d'onde, de manière à vérifier le critère de Rayleigh.

On indique toutefois que, comme les éléments à mailler dans la mise en œuvre du procédé selon l'invention sont
10 simplement des surfaces, les temps de calcul sont bien moins longs que ceux nécessaires dans la mise en œuvre d'un procédé de calcul de type "*par éléments finis*".

La présente invention peut ainsi se manifester par la mise
15 en œuvre d'une succession d'instructions d'un produit programme d'ordinateur stocké dans la mémoire d'un disque dur ou sur un support amovible et se déroulant comme suit :

- choix d'un pas de maillage notamment en fonction de la
20 longueur d'onde de l'onde principale ;
- détermination des coordonnées des sources S_i et/ou S'_i et des points de contact P_i et/ou P'_i ;
- choix d'un type d'onde en jeu et calcul des coefficients des matrices d'interaction appliquées aux
25 points P_i et/ou P'_i par la mise en œuvre d'un logiciel de calcul matriciel ;
- choix d'une loi de réflexion et/ou de transmission de la surface de l'obstacle et calcul des coefficients des matrices de réflexion et/ou de transmission ;
- 30 - calcul des valeurs des sources S_i et/ou S'_i ; et

- calcul des grandeurs scalaires ou vectorielles en tout point de l'espace tridimensionnel.

5 A ce titre, la présente invention vise aussi un tel produit programme d'ordinateur, stocké dans une mémoire d'unité centrale ou sur un support amovible propre à coopérer avec un lecteur de cette unité centrale, et comportant en particulier des instructions pour mettre en œuvre le procédé selon l'invention.

10

Bien entendu, la présente invention ne se limite pas à la forme de réalisation décrite ci-avant à titre d'exemple ; elle s'étend à d'autres variantes.

15

Ainsi, on comprendra que, même si dans les figures commentées ci-avant on représente à la fois la surface d'un obstacle et la surface d'un élément rayonnant, la présente invention s'applique aussi à l'estimation de grandeurs physiques dans le cadre d'une onde interagissant avec un obstacle et émise en champ lointain. Dans ce

20

contexte, il n'est pas nécessaire de matérialiser la surface d'un élément rayonnant à mailler et les relations [8] et [14] ci-avant suffisent à déterminer l'interaction entre cette onde et l'obstacle.

25

On a indiqué ci-avant des équations permettant de calculer les grandeurs scalaires ou vectorielles en un point M de l'espace, pour des ondes électromagnétiques, ou encore acoustiques. Bien entendu, ces grandeurs peuvent être

30

estimées pour d'autres types d'ondes, notamment pour des

ondes thermiques, des ondes électromagnétiques impliquant des antennes radiofréquences, ou autres.

5 Bien entendu, la présente invention ne se limite pas à une application au contrôle non destructif, mais à tout type d'application, notamment en imagerie médicale, par exemple pour l'étude de microsystemes mettant en œuvre une microscopie acoustique à miroirs mobiles.

10 On a décrit ci-avant des interactions entre une onde et un obstacle unique. Bien entendu, la présente invention s'applique à une interaction avec plusieurs obstacles. A cet effet, il convient simplement de mailler les surfaces de ces obstacles et d'additionner leur contribution pour
15 l'estimation d'une grandeur vectorielle ou scalaire en un point quelconque de l'espace. De même, comme indiqué ci-avant, la surface de l'obstacle OBS peut être plane, ou encore incurvée, ou encore de forme complexe quelconque.

20 Ainsi, dans le cadre d'une onde interagissant avec plusieurs obstacles dans l'espace, une simulation équivalente à celle représentée sur la figure 5C permettrait de positionner des capteurs et/ou des éléments rayonnants en fonction de la configuration de ces
25 obstacles, notamment pour une application à la détermination de la position de hauts-parleurs dans un habitacle cloisonné, tel qu'un habitacle de véhicule automobile.

30 L'espace tridimensionnel peut être découpé en une pluralité de régions, comme décrit ci-avant en référence

aux figures 4A, 4B, 5A et 5B. Toutefois, pour qu'une surface de l'une desdites régions soit considérée comme un obstacle d'une onde principale, devenant actif par émission d'une onde secondaire, l'incidence de l'onde
s principale sur cette surface doit préférentiellement rester inférieure ou égale à 90° .

Revendications

1. Procédé pour évaluer une grandeur physique associée à une interaction entre une onde et un obstacle, dans une région de l'espace tridimensionnel, dans lequel :
- 5 a) on détermine, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface (dS_i) dont une partie au moins représente la surface d'un obstacle recevant une onde principale et émettant, en réponse, une onde secondaire, et l'on attribue à chaque échantillon de surface au moins
- 10 une source (S_i) émettant une onde élémentaire représentant une contribution à ladite onde secondaire,
- b) on forme un système matriciel comportant :
- une matrice d'interaction ($F(M)$), inversible,
 - 15 appliquée à une région donnée (M) de l'espace et comportant un nombre de colonnes correspondant à un nombre total de sources,
 - une première matrice colonne dont chaque coefficient (v_i) est associé à une source (S_i) et caractérise
 - 20 l'onde élémentaire qu'elle émet,
 - et une seconde matrice colonne, obtenue par une multiplication de la première matrice colonne par la matrice d'interaction et dont les coefficients sont des valeurs d'une grandeur physique ($V(M)$)
 - 25 représentative de l'onde émise par l'ensemble des sources en ladite région donnée (M),
- c) pour estimer les coefficients de la première matrice colonne (v_i), on affecte des valeurs de grandeur physique choisies ($V(P_i)$) à des points prédéterminés (P_i), associés
- 30 chacun à un échantillon de surface (dS_i), lesdites valeurs choisies ($V(P_i)$) étant rangées dans la seconde matrice

colonne, et l'on multiplie cette seconde matrice colonne par l'inverse de la matrice d'interaction appliquée auxdits points prédéterminés (P_i),

- 5 d) pour évaluer ladite grandeur physique ($V(M)$) représentant l'onde émise par l'ensemble des sources dans une région donnée (M) de l'espace tridimensionnel, on applique la matrice d'interaction à ladite région donnée (M) et on multiplie cette matrice d'interaction par la première matrice colonne comportant les coefficients
- 10 estimés à l'étape c).

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel, pour évaluer une grandeur physique représentative d'une interaction entre un élément rayonnant une onde principale

15 et un obstacle recevant cette onde principale,

- à l'étape a), on détermine en outre, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface (dS'_i) représentant ensemble une surface active de l'élément rayonnant l'onde principale, et l'on attribue à chaque échantillon de la
- 20 surface active au moins une source (S'_i) émettant une onde élémentaire représentant une contribution à ladite onde principale,

- on applique en outre les étapes b), c) et d) aux échantillons de la surface active, et
- 25 - on évalue ladite grandeur physique ($V(M)$) représentant l'interaction entre l'élément rayonnant et l'obstacle dans une région donnée (M) de l'espace tridimensionnel, en prenant en compte la contribution, en ladite région donnée (M), de l'onde principale émise par l'ensemble des sources
- 30 de la surface active et la contribution de l'onde

secondaire émise par l'ensemble des sources de la surface de l'obstacle.

3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel chaque coefficient de la matrice d'interaction, appliquée à une région donnée de l'espace, est représentatif d'une interaction entre une source et ladite région donnée et la valeur de chaque coefficient est fonction d'une distance entre une source et ladite région donnée.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel la matrice d'interaction appliquée, à l'étape c), auxdits points prédéterminés (P_i), comporte un nombre de lignes correspondant à un nombre total de points prédéterminés (P_i).

5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la grandeur physique à évaluer est une grandeur scalaire ($V(P_i)$) et, à l'étape a), on attribue une source unique à chaque échantillon de surface.

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel la matrice d'interaction ($F(M)$) appliquée, à l'étape d), à une région de l'espace (M), comporte une ligne.

7. Procédé selon l'une des revendications 5 et 6, dans lequel chaque point prédéterminé (P_i) associé à un échantillon de surface (dS_i) correspond à un point de contact entre cet échantillon de surface (dS_i) et un hémisphère dont la surface est égale à la surface de cet

échantillon de surface, et de centre correspondant à une position de la source (S_i) qui est attribuée à cet échantillon de surface.

5 8. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel :

- l'onde principale est une onde électrique,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de charge électrique associées chacune à une
- 10 source, et
- les coefficients de la seconde matrice colonne sont des valeurs de potentiel électrique.

15 9. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel :

- l'onde principale est une onde magnétique,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de flux magnétique associées chacune à une source,
- et
- 20 - les coefficients de la seconde matrice colonne sont des valeurs de potentiel magnétique.

10. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel:

- 25 - l'onde principale est une onde sonore,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de vitesse de son associées chacune à une source,
- et
- les coefficients de la seconde matrice colonne sont des
- 30 valeurs de pression acoustique.

11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la grandeur physique à évaluer est une grandeur vectorielle ($\underline{V}(P_i)$) exprimée par ses trois coordonnées dans l'espace tridimensionnel, et l'on attribue, à l'étape a), trois sources (SA_i, SB_i, SC_i) à chaque échantillon de surface (dSi).
12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel la matrice d'interaction ($F_v(M)$) appliquée, à l'étape d), à une région de l'espace (M), comporte une ligne pour chaque coordonnée (X, Y, Z) de l'espace.
13. Procédé selon l'une des revendications 11 et 12, dans lequel :
- les trois sources attribuées à chaque échantillon de surface sont sensiblement dans un même plan et
 - chaque point prédéterminé (P_i) associé à un échantillon de surface (dSi) correspond à un point de contact entre cet échantillon et un hémisphère dont la surface est égale à la surface de cet échantillon, et de centre correspondant à la position d'un barycentre des trois sources.
14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel les trois sources d'un même échantillon de surface forment sensiblement un triangle équilatéral, et les triangles des échantillons de surface sont orientés sensiblement aléatoirement les uns par rapport aux autres.
15. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, dans lequel :

- l'onde principale est une onde électrique,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de charge électrique associées chacune à une source, et
- 5 - les coefficients de la seconde matrice colonne sont des valeurs de coordonnées d'un champ électrique.

16. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, dans lequel :

- 10 - l'onde principale est une onde magnétique,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de flux magnétique associées chacune à une source, et
- les coefficients de la seconde matrice colonne sont des
- 15 valeurs de coordonnées d'un champ magnétique.

17. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, dans lequel :

- l'onde principale est une onde sonore,
- 20 - les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de vitesse de son associées chacune à une source, et
- les coefficients de la seconde matrice colonne sont des valeurs de coordonnées d'une vitesse acoustique.

25

18. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, pour estimer la contribution de l'onde secondaire en ladite région donnée à l'étape d), lesdites valeurs de grandeur physique ($V(P_i)$) choisies à l'étape c)
- 30 sont fonction d'un coefficient prédéterminé de réflexion

et/ou de transmission de l'onde principale par chaque échantillon de surface de l'obstacle.

19. Procédé selon la revendication 18, prise en
5 combinaison avec l'une des revendications 6 et 12, dans lequel l'onde secondaire correspond à une réflexion de l'onde principale sur l'obstacle et l'hémisphère est orienté vers l'extérieur de l'obstacle.

10 20. Procédé selon la revendication 18, prise en combinaison avec l'une des revendications 6 et 12, dans lequel l'onde secondaire correspond à une transmission de l'onde principale dans l'obstacle et l'hémisphère est orienté vers l'intérieur de l'obstacle.

15 21. Procédé selon l'une des revendications 19 et 20, dans lequel, à l'étape c), on détermine les valeurs (v_i) associées aux sources (S_i) de l'élément rayonnant (ER) et on met en forme au moins :

- 20 - une première matrice d'interaction ($F(P)$) représentant la contribution des sources de l'obstacle aux points prédéterminés de la surface de l'obstacle (P_i),
- une seconde matrice d'interaction ($F'(P)$) représentant la contribution des sources de l'élément rayonnant aux
25 points prédéterminés de la surface de l'obstacle (P_i),
- une matrice de réflexion (R) ou de transmission (T), dont les coefficients représentent des coefficients de réflexion ou de transmission en chaque point prédéterminé (P_i) de l'obstacle,
30 pour déterminer les valeurs des sources de l'obstacle (v_i) en fonction des valeurs des sources de l'élément rayonnant

(v'_i) et d'une multiplication des première et seconde matrices d'interaction et de la matrice de réflexion ou de transmission.

5 22. Procédé selon la revendication 21, dans lequel, à l'étape c), on détermine les valeurs (v'_i) associées aux sources (S'_i) de l'élément rayonnant (ER) en tenant compte de la réception de l'onde secondaire par l'élément rayonnant (ER) et en mettant en forme en outre :

10 - une troisième matrice d'interaction ($F(P')$) représentant la contribution des sources de l'obstacle aux points prédéterminés de la surface de l'élément rayonnant (P'_i),
- et une quatrième matrice d'interaction ($F'(P')$) représentant la contribution des sources de l'élément
15 rayonnant aux points prédéterminés de la surface de l'élément rayonnant (P'_i).

20 23. Procédé selon l'une des revendications 19 à 22, dans lequel la surface de l'obstacle correspond à une interface entre deux milieux distincts d'une hétérostructure.

24. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'onde principale est une onde sonore et les coefficients de la matrice d'interaction sont chacun
25 fonction d'un angle d'incidence d'une onde élémentaire issue d'une source en ladite région donnée (M).

25. Procédé selon l'une des revendications 7 et 13, dans lequel, pour chaque échantillon de surface, on teste la
30 valeur d'un produit scalaire entre :

- un premier vecteur (\vec{r}) normal à l'échantillon de surface et dirigé vers le sommet (P) de l'hémisphère (fig. 7A), et
- un second vecteur (\overrightarrow{SM}) tiré entre une source (S) associée à cet hémisphère et ladite région donnée (M),

5 en distinguant :

- le cas où ce produit scalaire est inférieur à un seuil prédéterminé et la contribution de cette source n'est pas prise en compte, et
 - le cas où ce produit scalaire est supérieur à un
- 10 seuil prédéterminé et la contribution de cette source est effectivement prise en compte.

26. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'onde principale est une onde sonore et, à

15 l'étape a), on choisit un nombre total d'échantillons de surface (dS_i) sensiblement en fonction d'une longueur d'onde de l'onde sonore pour vérifier le critère de Rayleigh.

20 27. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on compare une pluralité de valeurs de la grandeur physique estimée à l'étape d), obtenues pour une pluralité de régions de l'espace, pour sélectionner une région candidate pour la disposition d'un élément

25 rayonnant destiné à interagir avec l'obstacle.

28. Procédé selon l'une des revendications 2 à 27, dans lequel l'élément rayonnant est un capteur, pour un contrôle non destructif, destiné à analyser un objet

30 formant un obstacle de l'onde principale.

29. Produit programme d'ordinateur, stocké dans une mémoire d'unité centrale ou sur un support amovible propre à coopérer avec un lecteur de cette unité centrale, caractérisé en ce qu'il comporte des instructions pour
5 mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications précédentes.

1/9

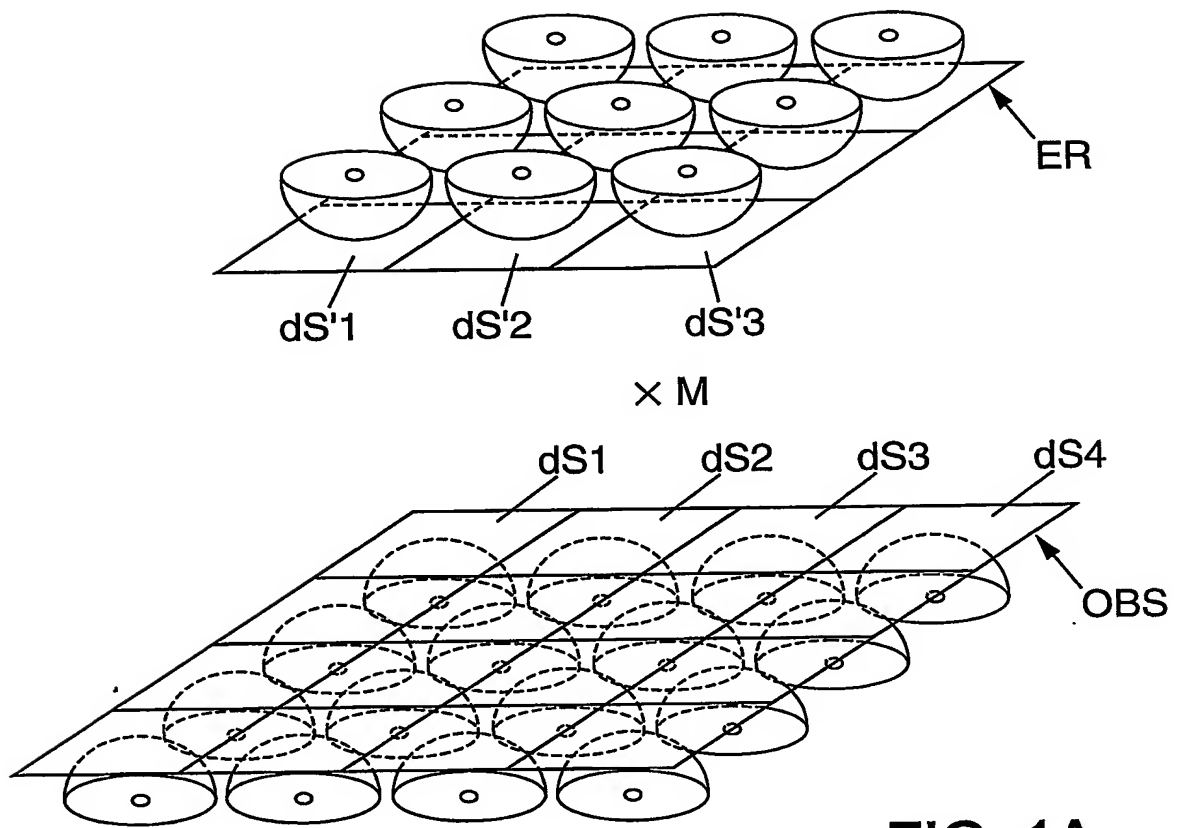


FIG. 1A

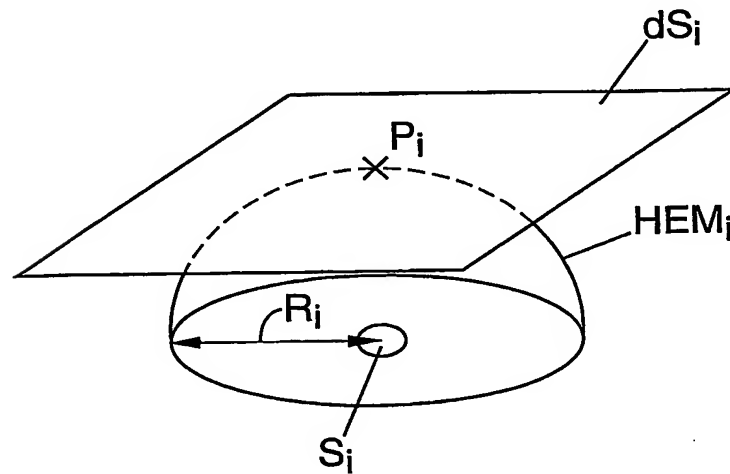


FIG. 1B

2/9

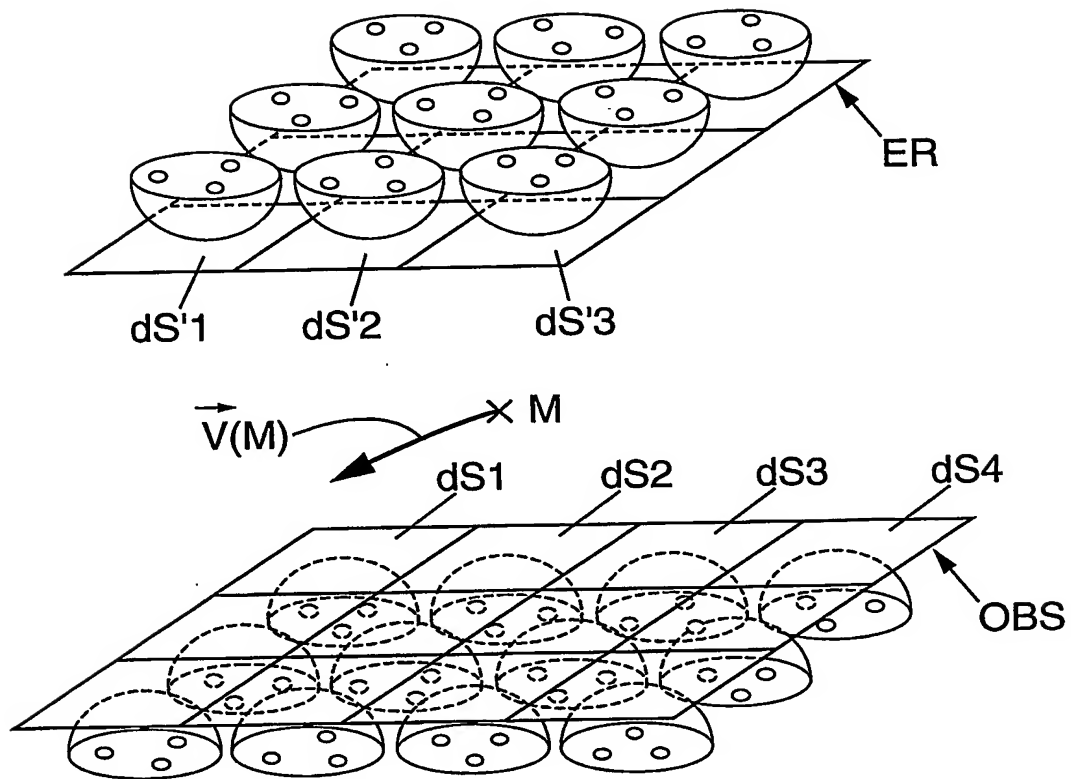


FIG. 2A

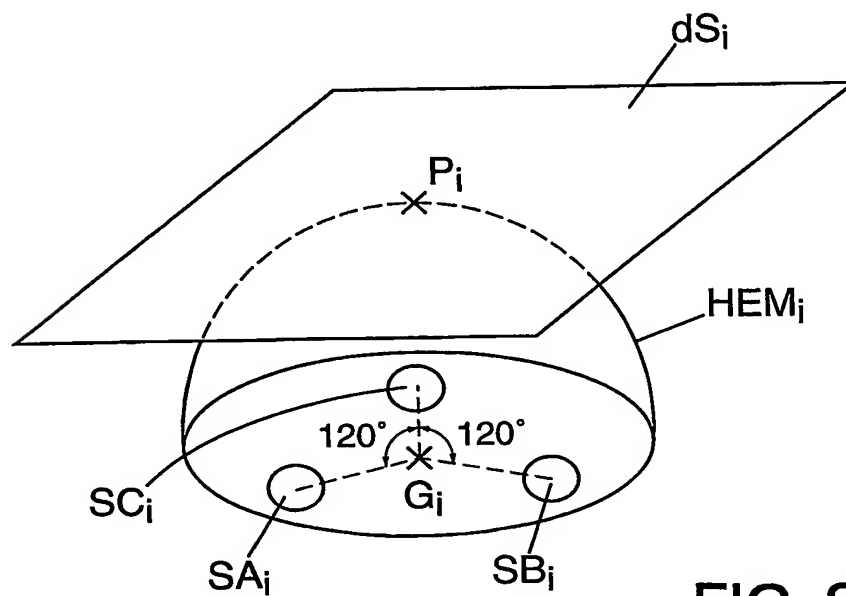


FIG. 2B

3/9

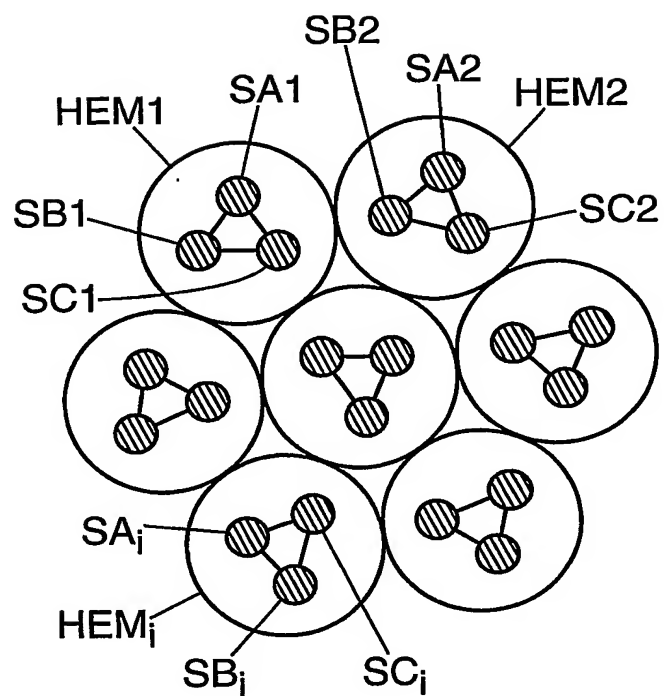
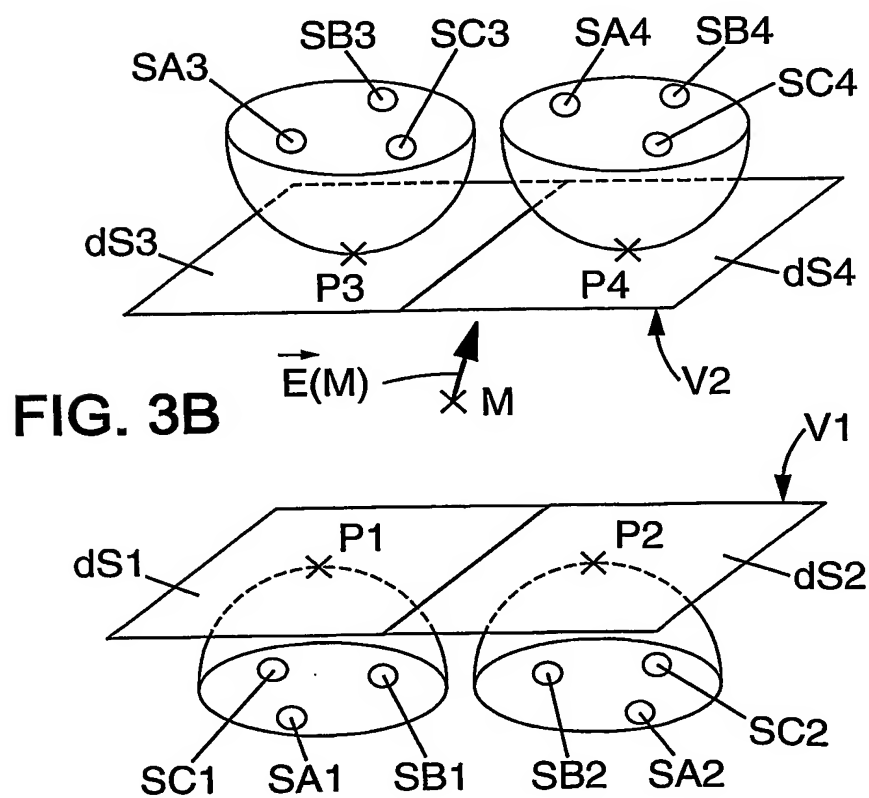
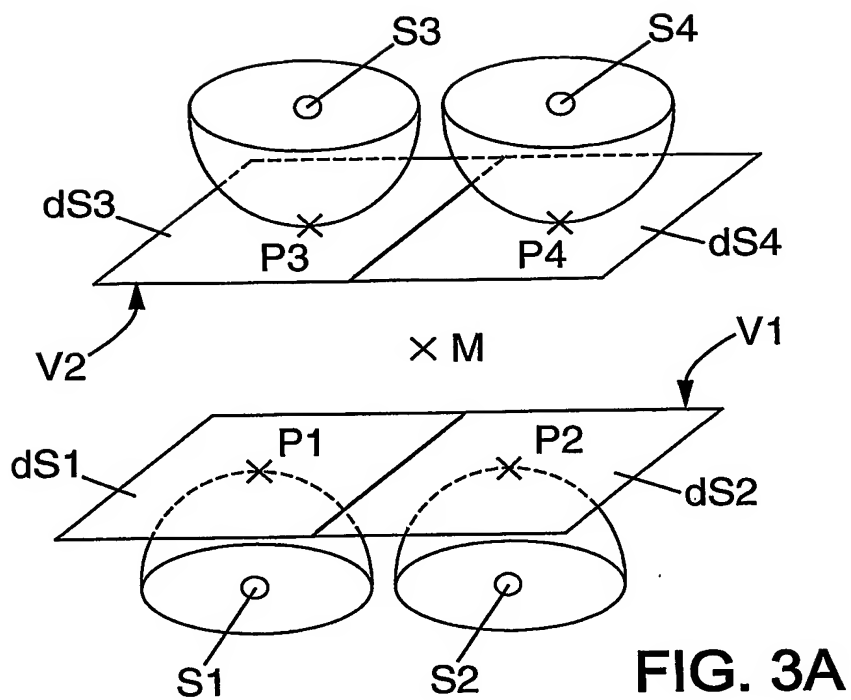


FIG. 2C

4/9



5/9

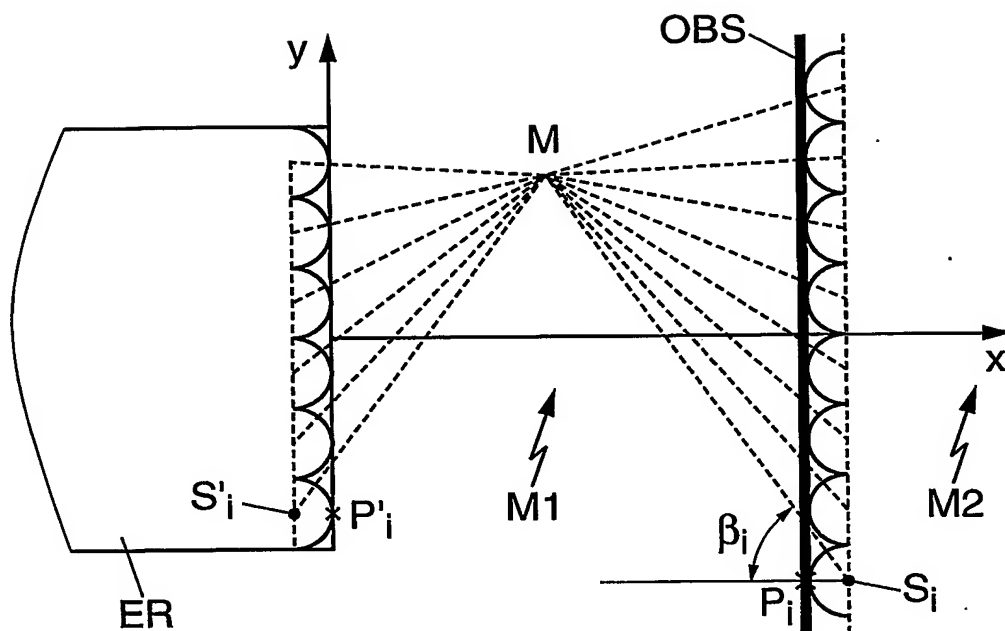


FIG. 4A

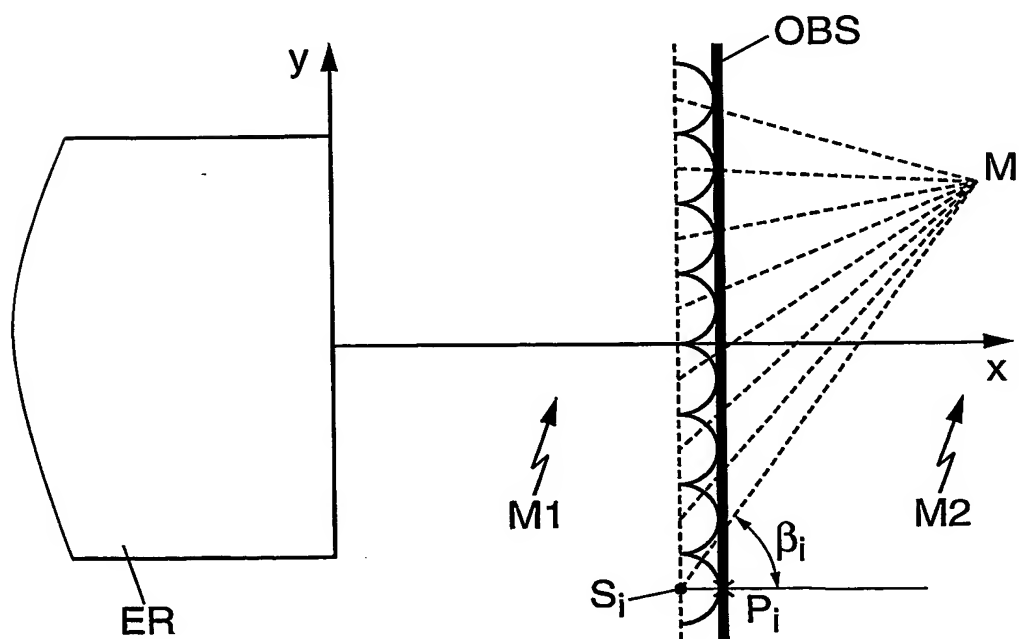


FIG. 4B

6/9

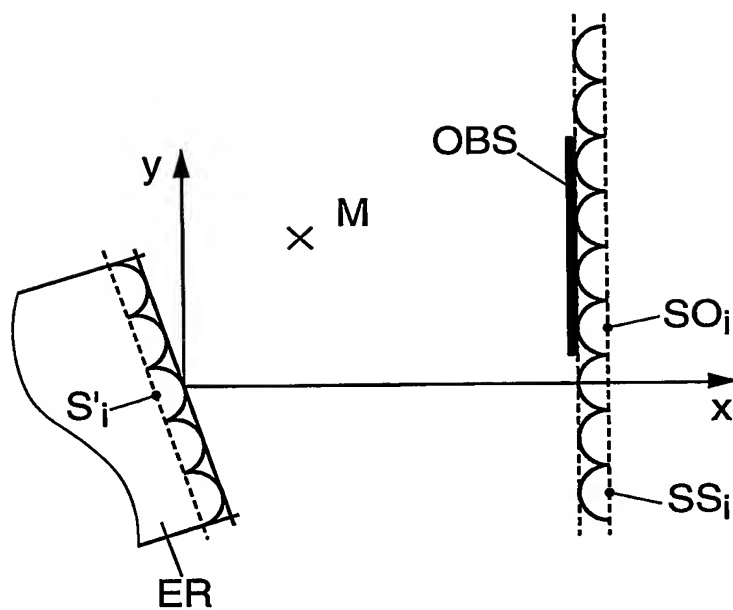


FIG. 5A

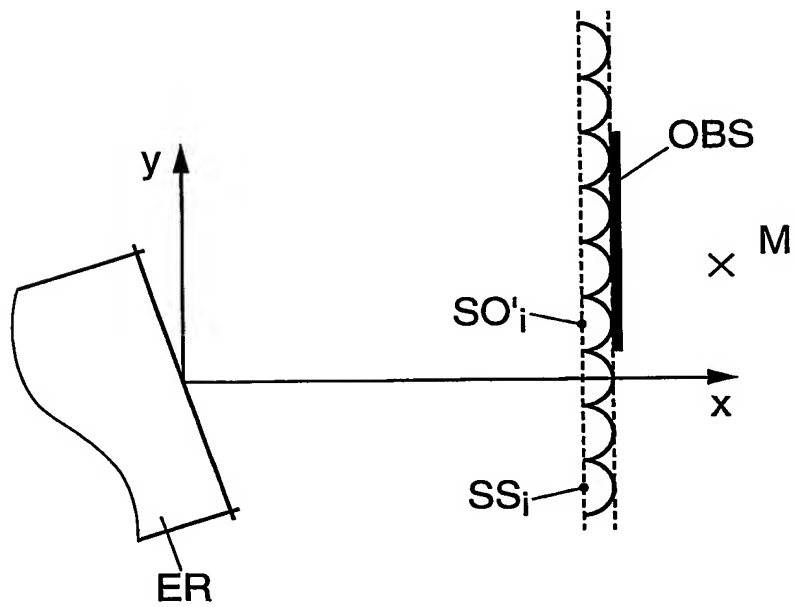


FIG. 5B

7/9

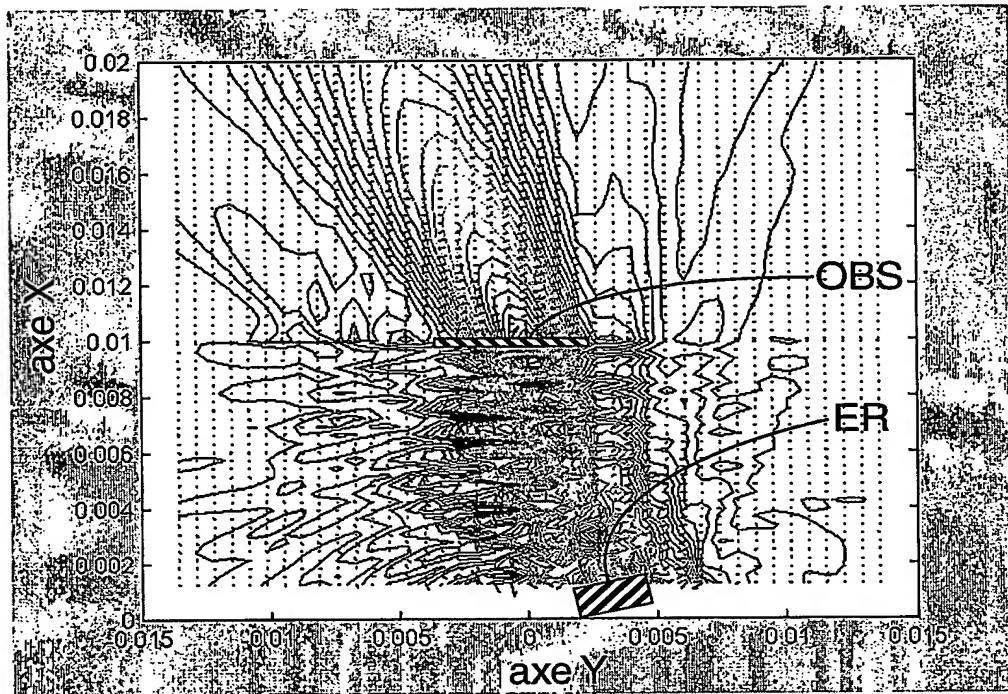
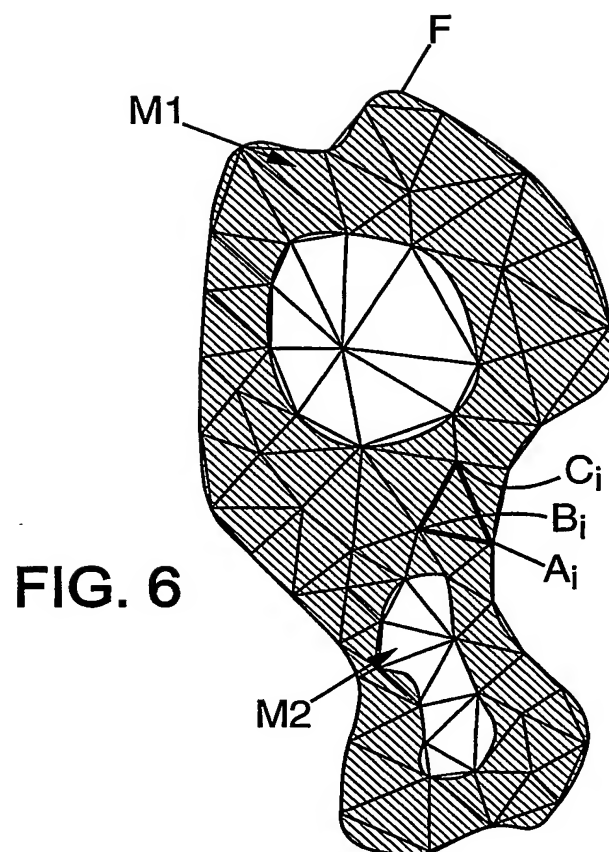


FIG. 5C



9/9

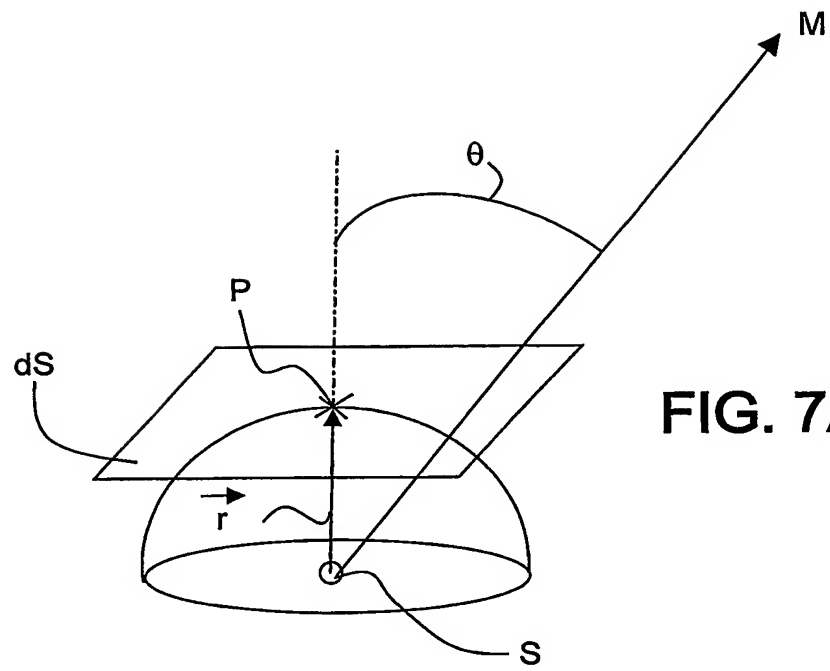


FIG. 7A

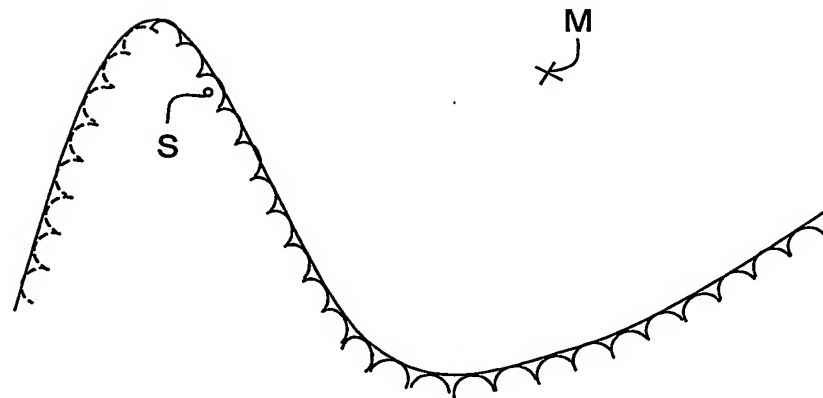


FIG. 7B

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR 03/03323

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G06F17/50

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|------------|---|-----------------------|
| X | LIEBEAUX N ET AL: "The distributed sources method: a concept for open magnetic cores modelling" EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL, APPLIED PHYSICS, NOV. 2002, EDP SCIENCES, FRANCE, 'Online! vol. 20, no. 2, 25 October 2002 (2002-10-25), pages 145-150, XP008021970 ISSN: 1286-0042 Retrieved from the Internet: URL: http://www.edpsciences.org/articles/epjap/pdf/2002/11/ap01142.pdf 'retrieved on 2003-09-16! | 1-10, 28, 29 |
| A | the whole document ----- -/-- | 11-27 |

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☐ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

G document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 March 2004

Date of mailing of the international search report

25/03/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Guingale, A

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Internatio plication No
PCT/Fr 03/03323

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category ° | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|------------|---|-----------------------|
| X | <p>PLACKO D ET AL: "Theoretical study of magnetic and ultrasonic sensors: dependence of magnetic potential and acoustic pressure on the sensor geometry" ADVANCED NONDESTRUCTIVE EVALUATION FOR STRUCTURAL AND BIOLOGICAL HEALTH MONITORING, NEWPORT BEACH, CA, USA, 6-8 MARCH 2001, vol. 4335, 6 March 2001 (2001-03-06), pages 52-62, XP008021972 Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, USA ISSN: 0277-786X</p> | 1-10, 28, 29 |
| A | <p>the whole document</p> | 11-27 |
| A | <p>PLACKO D ET AL: "Theoretical computation of acoustic pressure generated by ultrasonic sensors in the presence of an interface" SMART NONDESTRUCTIVE EVALUATION FOR HEALTH MONITORING OF STRUCTURAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS, NEWPORT BEACH, USA, 18-20 MARCH 2002, vol. 4702, 18 March 2002 (2002-03-18), pages 157-168, XP008021971 Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, USA ISSN: 0277-786X</p> <p>the whole document</p> | 1-29 |

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No
PCT/FR-03/03323

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G06F17/50

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
CIB 7 G06F

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

| Catégorie * | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents | no. des revendications visées |
|-------------|---|-------------------------------|
| X | LIEBEAUX N ET AL: "The distributed sources method: a concept for open magnetic cores modelling" EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL, APPLIED PHYSICS, NOV. 2002, EDP SCIENCES, FRANCE, 'Online! vol. 20, no. 2, 25 octobre 2002 (2002-10-25), pages 145-150, XP008021970 ISSN: 1286-0042 Extrait de l'Internet: URL: http://www.edpsciences.org/articles/epjap/pdf/2002/11/ap01142.pdf 'extrait le 2003-09-16! | 1-10, 28, 29 |
| A | le document en entier ----- -/- | 11-27 |

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☐ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

T document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

X document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

Y document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

Z document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

15 mars 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

25/03/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Guingale, A

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No
PCT/FR 3/03323

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

| Catégorie | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents | no. des revendications visées |
|-----------|---|-------------------------------|
| X | <p>PLACKO D ET AL: "Theoretical study of magnetic and ultrasonic sensors: dependence of magnetic potential and acoustic pressure on the sensor geometry" ADVANCED NONDESTRUCTIVE EVALUATION FOR STRUCTURAL AND BIOLOGICAL HEALTH MONITORING, NEWPORT BEACH, CA, USA, 6-8 MARCH 2001, vol. 4335, 6 mars 2001 (2001-03-06), pages 52-62, XP008021972</p> <p>Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, USA ISSN: 0277-786X</p> | 1-10, 28, 29 |
| A | le document en entier | 11-27 |
| A | <p>PLACKO D ET AL: "Theoretical computation of acoustic pressure generated by ultrasonic sensors in the presence of an interface" SMART NONDESTRUCTIVE EVALUATION FOR HEALTH MONITORING OF STRUCTURAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS, NEWPORT BEACH, USA, 18-20 MARCH 2002, vol. 4702, 18 mars 2002 (2002-03-18), pages 157-168, XP008021971</p> <p>Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, USA ISSN: 0277-786X</p> | 1-29 |
| | le document en entier | |